

Treball de Fi de Grau/Màster

## **GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS**

### **Estudi hidrodinàmic dels flotadors d'un patí a vela i proposta d'un nou model de millora**

#### **MEMÒRIA**

**Autor:** Lluís Giralt Ibañez  
**Director:** Enric Trillas Gay  
**Convocatòria:** Juny 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resum

“Estudi hidrodinàmic dels flotadors d’un patí a vela i proposta d’un nou model de millora” és un projecte englobat dins de la mecànica de fluids que realitza un estudi dels flotadors d’un patí a vela. Analitzant el seu comportament es vol fer posteriorment una millora del model actual.

Aquesta embarcació artesanal típica de la costa catalana s’ha mantingut amb una geometria gairebé invariant des dels seus inicis. Mai ha gaudit d’un estudi de les seves característiques d’interacció amb l’aigua durant el seu ús, per la qual cosa no es sap si el seu disseny és realment bo. Per aquest motiu, en aquest projecte es duu a terme una anàlisi de les forces que apareixen en el casc i característiques hidrodinàmiques del seu funcionament amb ajut de la simulació per ordinador CFD. Així doncs es pot saber com funciona i si realment val la pena realitzar una modificació en la seva geometria. S’estudia principalment les forces de resistència a l’avanç i de sustentació, juntament amb els camps de velocitats i pressions que apareixen al voltant del cos.

Un cop s’han obtingut els resultats, es fixa com a objectiu proposar una millora de disseny que perfeccioni les seves característiques. Principalment es vol reduir les forces que frenen el vaixell, proporcionant un major rang de velocitats d’ús. Per fer-ho es planteja crear un dispositiu d’hydrofoil, igual que s’ha fet en altres branques de la nàutica, per elevar el patí per sobre el nivell del mar, minimitzant l’àrea de contacte i les forces que s’oposen al moviment. Alhora, s’aprofita les característiques de velocitat per sustentar el patí, obtenint un disseny de flotador més bo.

Es realitza un estudi en profunditat en l’àmbit teòric i experimental d’aquests dispositius, emprant també la simulació de problemes CFD. D’aquesta manera es crea el dispositiu final capaç de complir amb les especificacions necessàries de funcionament que es plantegen.

# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>2</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>SUMARI DE FIGURES</b>	<b>6</b>
<b>SUMARI DE TAULES</b>	<b>9</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>11</b>
1.1. Vocabulari i conceptes .....	11
1.2. Símbols .....	12
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>14</b>
2.1. Origen i motivació del projecte .....	14
2.2. Requeriments previs .....	14
2.3. Objectius del projecte .....	15
2.4. Abast del projecte .....	15
<b>3. EL PATÍ A VELA O PATÍ CATALÀ</b>	<b>17</b>
3.1. Història .....	17
3.2. ADIPAV .....	18
3.3. Normativa .....	19
3.3.1. Dos normatives .....	19
3.4. Forma de l'embarcació .....	20
3.5. Construcció .....	21
3.5.1. Procés constructiu .....	22
<b>4. DINÀMICA DE FLUIDS</b>	<b>23</b>
4.1. Introducció a la dinàmica de fluids .....	23
4.2. Números adimensionals .....	23
4.2.1. Nombre de Reynolds .....	24
4.2.2. Nombre de Froude .....	24
4.2.3. Coeficient de sustentació .....	25
4.2.4. Coeficient de resistència a l'avanç .....	25
4.3. Model capa límit .....	26
4.4. Forces de Lift i Drag .....	27
4.4.1. Força de Lift o de sustentació ( $F_L$ ) .....	27
4.4.2. Força de drag o resistència a l'avanç .....	28
4.4.3. L'angle d'atac .....	29

4.4.4.	Entrada en pèrdua .....	29
4.5.	Perfils hidrodinàmics: l'hydrofoil .....	30
4.5.1.	Força de resistència a l'avanç induïda .....	32
<b>5.</b>	<b>MODELITZACIÓ I ESTUDI DE GEOMETRIA DEL FLOTADOR ACTUAL</b>	<b>33</b>
5.1.	Condicions de simulació: Consideracions a tenir en compte.....	33
5.2.	Model de SOLIDWORKS.....	35
5.3.	Model de ANSYS Fluent (CFD) .....	36
5.3.1.	Geometria del problema .....	37
5.3.2.	Creació del mallat .....	38
5.3.3.	Configuració del problema amb fluent.....	39
5.3.4.	Simulació i procés iteratiu .....	40
5.4.	Resultats obtinguts .....	41
5.5.	Anàlisis de comportament del flotador.....	44
5.5.1.	Camp de velocitats .....	44
5.5.2.	Línies de corrent .....	46
5.5.3.	Camp de pressions.....	47
<b>6.</b>	<b>MILLORA DEL MODEL: MODELITZACIÓ I ESTUDI</b>	<b>49</b>
6.1.	Procés de selecció del perfil .....	49
6.1.1.	Possibles perfils estudiats.....	50
I.	EPPLER 66 AIRFOIL (e66-il) .....	50
II.	GOE 547 AIRFOIL (goe547-il) .....	52
III.	FX 63-100 AIRFOIL (fx63100-il).....	53
6.1.2.	Selecció geometria d'hydrofoil .....	55
6.2.	Procés de disseny d'hydrofoil a partir d'un e66-il.....	56
6.3.	Model d'hydrofoil definitiu: estudi .....	59
6.4.	Model d'hydrofoil definitiu: resultats obtinguts .....	62
6.5.	Anàlisis de comportament.....	63
6.5.1.	Camp de velocitats .....	63
6.5.2.	Línies de corrent .....	65
6.5.3.	Camp de pressions.....	67
6.6.	Model 3D: exemple de proposta de disseny.....	68
<b>7.</b>	<b>PLANIFICACIÓ</b>	<b>70</b>
<b>8.</b>	<b>ESTUDI ECONÒMIC</b>	<b>72</b>
<b>9.</b>	<b>IMPACTE MEDIAMBIENTAL</b>	<b>74</b>

<b>CONCLUSIONS</b>	<b>75</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>78</b>
Referències bibliogràfiques.....	78
Bibliografia complementària.....	79
<b>ANNEXOS</b>	<b>80</b>
Annex 1: Plànols de construcció del patí a vela [12] .....	80

## Sumari de figures

Figura 3.1 Patí a vela a la costa catalana els anys cinquanta [1] .....	17
Figura 3.2 Recorregut d'una regata de patí a vela [2].....	20
Figura 3.3 Parts d'un patí a vela [3].....	21
Figura 4.1 Capa límit en una placa plana [4] .....	26
Figura 4.2 Despreniment de capa límit en un perfil [5] .....	27
Figura 4.3 Distribució de pressions en un perfil d'ala [6].....	28
Figura 4.4 Forces de drag i lift.....	29
Figura 4.5 Angle d'atac en un perfil d'ala [7].....	29
Figura 4.6 Increment d'angle d'atac i entrada en pèrdua [8].....	30
Figura 4.7 Parts d'un perfil d'ala o d'hydrofoil [9] .....	31
Figura 4.8 Efecte de la resistència d'avanç induïda [10].....	32
Figura 5.1 Patí a vela escorant [11].....	34
Figura 5.2 Model geomètric creat amb SOLIDWORKS .....	36
Figura 5.3 Model geomètric amb transformacions d'angle .....	37
Figura 5.4 Flotador dins del domini d'estudi .....	38
Figura 5.5 Secció del mallat del model flotador .....	38
Figura 5.6 Evolució dels residus del model flotador .....	40
Figura 5.7 Evolució del coeficient de lift model flotador .....	41
Figura 5.8 Evolució del coeficient de drag model flotador .....	41
Figura 5.9 Tall realitzat al model de flotador segons el seu volum submergit aproximat .....	44
Figura 5.10 Distribució de velocitats al llarg del flotador .....	45
Figura 5.11 Distribució de velocitats en la proa .....	46

Figura 5.12 Distribució de velocitats en la popa .....	46
Figura 5.13 Línies de corrent rodejant el flotador .....	47
Figura 5.14 Distribució de pressions al llarg del flotador.....	48
Figura 5.15 Distribució de pressions a la proa.....	48
Figura 5.16 Distribució de pressions a la popa.....	48
Figura 6.1 EPPLER 66 AIRFOIL (e66-il) .....	51
Figura 6.2 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ ) .....	51
Figura 6.3 Gràfics $\beta$ vs angle d'atac ( $\alpha$ ) i CD vs angle d'atac ( $\alpha$ ).....	52
Figura 6.4 GOE 547 AIRFOIL (goe547-il) .....	52
Figura 6.5 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ ) .....	53
Figura 6.6 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ ) .....	53
Figura 6.7 FX 63-100 AIRFOIL (fx63100-il).....	54
Figura 6.8 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ ) .....	54
Figura 6.9 . Gràfics $\beta$ vs angle d'atac ( $\alpha$ ) i CD vs angle d'atac ( $\alpha$ ).....	54
Figura 6.10 Comparativa de CL vs CD de cada perfil .....	55
Figura 6.11 Secció de la tija .....	58
Figura 6.12 Alçat del dispositiu hydrofoil + tija.....	58
Figura 6.13 Geometria final de l'hydrofoil .....	59
Figura 6.14 Secció del mallat .....	60
Figura 6.15 Evolució dels residus de l'hydrofoil .....	61
Figura 6.16 Evolució del coeficient de lift de l'hydrofoil.....	61
Figura 6.17 Evolució del coeficient de drag de l'hydrofoil .....	61
Figura 6.18 Camp de velocitats de l'hydrofoil part superior .....	64

Figura 6.19 Camp de velocitats de l'hydrofoil part inferior .....	64
Figura 6.20 Camp de velocitats de la tija.....	65
Figura 6.21 Camp de velocitats i visualització de l'estela hydrofoil.....	65
Figura 6.22 Línies de corrent al voltant de l'hydrofoil.....	66
Figura 6.23 Reunió de les línies de corrent en sortir del perfil.....	66
Figura 6.24 Detall de l'efecte de resistència a l'avanç induït.....	67
Figura 6.25 Distribució de pressions del dispositiu a l'extradós i tija.....	68
Figura 6.26 Distribució de pressions del dispositiu a l'intradós.....	68
Figura 6.27 Exemple de disseny de flotador amb els dispositius creats.....	69
Figura 7.1 Diagrama de Gantt.....	71



## Sumari de taules

Taula 1 Resultats de $C_D$ i $C_L$ obtinguts a les simulacions .....	42
Taula 2 Resultats de $F_D$ i $F_L$ obtinguts per a cada velocitat .....	43
Taula 3 Comparativa de valors de coeficients teòrics envers els obtinguts per simulació amb Fluent .....	62
Taula 4 Forces de sustentació que regeixen el sistema.....	62
Taula 5 Forces de resistència a l'avanç que regeixen el sistema .....	62
Taula 6 Obtenció de la limitació de velocitat del nou model de flotador.....	63
Taula 7 Inici, final i duració de cada activitat del diagrama de Gantt .....	70
Taula 8 Llegenda de colors .....	70
Taula 9 Pressupost del projecte .....	73
Tabla 10 Comparativa $CO_2$ equivalent pel càlcul d'un model .....	74



# 1. Glossari

## 1.1. Vocabulari i conceptes

**ADIPAV:** Associació Deportiva Internacional de Propietaris de Patins a Vela.

**Barlovento:** és la direcció des de la qual arriba el vent. En termes d'ús en un patí a vela fa referència a posicionar-se al flotador que queda elevat al escorar.

**Capcineig:** sinònim d'oscil·lar.

**Carenat:** refereix a una geometria amb bones característiques aerodinàmiques.

**CFD:** en anglès són les sigles de "Computational Fluid Dynamics", és a dir, simulació computacional de dinàmica de fluids.

**Escota:** corda usada en una embarcació per regular l'angle d'incidència del vent sobre la vela al variar l'angle de la pròpia vela sobre l'eix longitudinal del vaixell. És l'eina bàsica de regulació de velocitat en el patí a vela.

**Eslora:** línia longitudinal d'un vaixell o embarcació, que va des de la proa fins a la popa.

**Línia de crugia:** línia paral·lela a l'eslora que divideix un buc en dues meitats simètriques. No tan sols s'usa per referir-se a l'embarcació completa, sinó que refereix a qualsevol línia de simetria que existeixi. En el cas del patí a vela n'hi ha tres: la genèrica del vaixell i una per a cada flotador.

**Línia de flotació:** fa referència al nivell de l'aigua sobre el casc d'una embarcació. Divideix la zona submergida i la zona que emergeix. Es defineix com una línia recte, sense tenir en compte l'onatge.

**Línia de través:** eix transversal que divideix una embarcació en dues meitats. És perpendicular a la línia de crugia.

**Màniga:** amplada d'una embarcació qualsevol mesurada en la seva secció més gran. És paral·lela a la línia de través.

**Nombre de Mach:** (Ma) nombre adimensional que proporciona informació sobre la compressibilitat en un flux determinat.

**Popa:** part posterior d'una embarcació.

**Proa:** part davantera d'una embarcació.

**Sotavento:** és la direcció cap a on es dirigeix al vent. En un patí a vela és el costat oposat a barlovento, referint-se al flotador que toca l'aigua al escorar.

**Teorema de Bernoulli:** estipula que, per un fluid no viscos, ideal i sense frecs, l'energia al llarg del flux es conserva. Les diferents formes en les que es pot trobar l'energia d'un flux és en forma d'energia cinètica, en forma d'energia potencial (depèn de l'alçada) i en forma de pressió. Per tant, entre dos trams d'un flux determinat, la suma d'aquestes magnituds s'ha de conservar. Es pot tenir en compte una pèrdua o una aportació energètica a causa de les forces de fregament o d'una bomba, per exemple, respectivament. En aquest cas es parla del teorema general de Bernoulli .

**Teorema de conservació de la massa:** estipula que, en un flux en regim estacionari, el flux màssic d'entrada en un volum de control és igual que el flux màssic de sortida. Si el fluid emprat és incompressible s'expressa simplement una igualtat entre els cabals d'entrada i sortida. Per això, en veure's modificada l'àrea de secció per on circula un fluid, aquest augmenta de velocitat.

## 1.2. Símbols

Símbol	Significat	Unitats
Re	Nombre de Reynolds	Adimensional
$\rho$	Densitat	kg/m <sup>3</sup>
U	Velocitat	m/s
$\mu$	Viscositat	kg/m·s
Fr	Nombre de Froude	Adimensional
g	Acceleració de la gravetat	m/s <sup>2</sup>
L	Paràmetre de longitud	m

$C_L$	Coeficient de sustentació/lift	Adimensional
$C_D$	Coeficient de resistència a l'avanç/drag	Adimensional
$Ma$	Nombre de Mach	Adimensional
$S$	Superfície	$m^2$
$\delta$	Gruix de capa límit	m
$\alpha$	Angle d'atac	$^\circ$
$\beta$	Rendiment o eficiència hidrodinàmica	Adimensional
$P$	Pressió	Pa

## 2. Introducció

### 2.1. Origen i motivació del projecte

El patí a vela és un esport que ha format part de la meua vida des de ben petit. La costa del maresme ha estat el bressol d'aquesta modalitat nàutica tradicional, que ha cobert de veles la zona des de fa uns 100 anys. El meu pare és un gran aficionat, i m'ha inculcat un amor incondicional pel mar, la platja, el vent i la llibertat que es respira gaudint d'allò que més t'agrada. No existeix modalitat de navegació més pura: una vela, una escota i el pes del patró regeixen la direcció i la velocitat.

Realitzar aquest treball era una gran oportunitat per unir una de les branques que més m'han agradat del món de l'enginyeria amb una part important de la meua infància. De fet, era també una forma de demostrar i agrair al meu pare tot allò que m'ha ensenyat des de petit. Així doncs, vaig proposar-me realitzar un estudi relacionat amb la dinàmica de fluids a l'interaccionar amb el patí a vela. Posteriorment, en consultar amb el que ha sigut el meu tutor durant la realització del projecte, es va decidir anar més enllà: intentar proposar una millora de disseny per perfeccionar les seves prestacions.

El patí a vela és un vaixell de construcció artesana, i mai ha gaudit d'un estudi d'aquestes característiques. La seva geometria s'ha modificat en comptades ocasions des dels seus inicis, i en tots els casos ha estat per simplificar el procés constructiu o per unificar criteris entre constructors, tal com es veu durant el treball. Per tant, en última instància, és també una ocasió per fer un pas més en l'evolució d'aquest esport, proporcionant resultats sobre el funcionament del model actual i fent una primera proposta de millora. Així doncs, en un futur es pot realitzar un estudi més extens per donar vida a les idees extretes en aquest projecte.

### 2.2. Requeriments previs

Per poder realitzar aquest TFG han sigut necessaris els coneixements de mecànica de fluids estudiats al llarg del grau, ja que s'han usat de forma activa per realitzar els càlculs, anàlisis de resultats obtinguts, estudis de comportament del flux... A part, s'ha pogut aprofundir més en tots els conceptes que ho engloben i s'ha vist una aplicació pràctica de tot el conjunt.

Tanmateix, ha sigut necessari el coneixement del programari utilitzat per la modalització i simulació per ordinador: el SOLIDWORKS i el ANSYS. Partint de la base obtinguda en diferents assignatures del grau sobre la utilització d'aquestes dues eines, s'ha pogut expandir el coneixement usant recursos nous que han permès resoldre els problemes de la forma més

òptima i correcte possible. Una dificultat afegida ha sigut haver de tractar amb models en 3D amb geometries complexes.

Pel que fa a l'elaboració de la planificació i els pressupostos, han sigut de gran ajuda els coneixements obtinguts en les matèries destinades a l'organització i la gestió. És un clar exemple l'elaboració d'un diagrama de Gantt.

## **2.3. Objectius del projecte**

El primer objectiu a complir és realitzar un estudi hidrodinàmic dels flotadors d'un patí a vela, amb intenció d'obtenir resultats prou fiables sobre el seu comportament en interaccionar amb l'aigua. Es vol comprendre el funcionament actual en condicions d'ús, amb les forces que es creen en el casc, i com afecta la geometria. Fent aquest estudi es tindrà un coneixement complet del model actual. És de vital importància per aconseguir els següents objectius.

En relació a aquest primer, es vol veure quina és la millor manera d'afrontar amb programari de simulació un problema d'aquestes característiques: quin tipus d'estudi s'ha de realitzar, quins paràmetres poden millorar els resultats, quins resultats són interessants d'obtenir, quines premisses cal tenir en compte...

El tercer objectiu a complir és proposar una millora geomètrica del flotador per incrementar la qualitat les seves prestacions. Es vol modificar la seva forma per reduir les forces que s'oposen al moviment. No es té en compte que la modificació dels flotadors pugui anar en contra de la normativa de competició d'aquestes embarcacions.

A més a més, per poder realitzar el nou disseny, es vol aprofundir en el coneixement dels dispositius d'hydrofoil i aprendre a com seleccionar un perfil que compleixi amb els requeriments necessaris per a la funció que durà a terme.

## **2.4. Abast del projecte**

En aquest projecte es realitzarà una breu introducció teòrica sobre els coneixements bàsics necessaris per a la comprensió del treball i dels anàlisis realitzats. No s'entrarà en profunditat en tots els teoremes que regeixen el comportament d'un flux fluid per un cos.

Pel que fa a l'estudi del flotador actual, es limitarà a l'observació de les forces que apareixen en el casc del flotador, juntament amb l'estudi de velocitats, pressions i línies de corrent del flux. Es vol saber com intervé la geometria del cos en els resultats obtinguts.

El nou disseny es realitzarà amb l'objectiu de millorar les condicions hidrodinàmiques inicials.

No obstant això, no es realitzarà un estudi de les forces internes de la nova geometria ni del material que caldria emprar per a la seva construcció.



## 3. El patí a vela o patí català

### 3.1. Història

El patí a vela o patí català és una embarcació lleugera molt simple i singular, que lliga de la forma més directe possible al seu tripulant amb el vent i el mar. Aquest fet es deu al fet que és una embarcació que no disposa ni de timó ni de quilla per a maniobrar, sinó que es dirigeix amb el simple joc de la vela i amb la col·locació del pes del propi patró. El flotador fa, a la vegada, el paper de quilla en la pròpia embarcació.

El naixement d'aquesta nau típica artesanal de la costa mediterrània es troba difós en la història de les platges catalanes degut a la falta de documentació. Els patins, també anomenats "patinadors", es van construir en un principi per fusters sense cap coneixement tècnic marítim amb l'ajut dels consells proporcionats pels propis futurs patrons que encarregaven l'embarcació. De fet, en els seus inicis en el segle XIX, ni tan sols disposaven de vela, sinó que s'impulsaven amb un rem o pala. Un dels primers documents que constata l'aparició d'aquesta nau és un article periodístic de l'època, l'octubre de 1871, gràcies a la celebració d'una regata d'aquests precaris patins en el port de Barcelona.

Sobre l'any 1920 el patí català va patir un boom degut a l'elevat nivell de contaminació de les aigües de la costa de Barcelona, per la falta de depuradores de tractament d'aigües residuals. Amb la intenció d'evitar la brutícia, els patinadors remaven fins a zones amb aigua cristal·lina, fet que va incitar al creixement d'aquesta modalitat de navegació entre els banyistes i aficionats al mar. Així doncs, tres socis del Club de Natació de Barcelona i un constructor anomenat Rafael Escolá van decidir crear el primer patí a vela amb tres conceptes molt simples: un mànstil, una vela i una escota.



*Figura 3.1 Patí a vela a la costa catalana els anys cinquanta [1]*

La història real del patí a vela es comença a desenvolupar gràcies a les regates que es van començar a celebrar partint de l'èxit dels primers models. La primera que va aparèixer en els medis gràfics, particularment el 1932 a la Vanguardia, va ser el Gran Premi de la Mercè. El principal problema d'aquestes regates era la gran varietat de mides dels patins que hi competien, ja que cap reglament estipulava la forma exacta de l'embarcació. Malauradament, la guerra civil va aturar de forma temporal l'evolució d'aquest esport.

Un cop finalitzada la guerra, van irrompre amb força en la història del patí a vela els germans Mongé, que van dedicar grans esforços en la creació d'un monotip que millorava de forma notable el disseny usat fins aleshores. Destaca l'any 1943, durant les festes de Les Santes de Mataró, quan els germans van arrasar en la regata gràcies al seu patí i es va decidir fer una competició entre els diferents constructors per estipular un monotip únic per a la construcció de l'embarcació. La regata es va dur a terme aquell mateix any a Vilanova i La Geltrú, amb els germans Mongé com a clars guanyadors. A partir d'aquest fet, la pràctica d'aquest esport es va desbordar, tant a nivell esportiu com a nivell usuari ocasional. Inclús es llogaven a peu de platja com es fa actualment amb els coneguts "patins a pedals". Tot i que la creació del monotip va marcar un abans i un després en el món de la navegació en patí a vela, la transició entre les dues etapes va ser una mica difosa, a causa dels patrons d'antigues naus que no volien comprar el nou model per la gran inversió que això suposava. Per aquest motiu, fins uns quants anys més tard es van realitzar regates de diverses categories perquè hi poguessin participar, però poc a poc van anar desapareixent.

L'any 1951, amb la creació de l'ADIPAV, es va estipular el plànol definitiu de construcció dels patins a vela, basats en el model dels germans Mongé, mantenint les línies d'aigua dels flotadors amb una petita modificació en la curvatura de la popa per facilitar la construcció. Des d'aleshores fins el dia d'avui, els canvis que ha patit el patí a vela han sigut mínims, i més aviat s'han basat en la utilització d'altres materials com l'alumini en els màstils o la fibra de vidre en el cos de l'embarcació.

## 3.2. ADIPAV

El 1951 es va crear l'Associació Deportiva Internacional de Propietaris de Patins a Vela (ADIPAV), una associació que uneix tots els Clubs Nàutics per tal de regular i ampliar de forma conjunta l'evolució del patí a vela amb ajuda de l'Assemblea Nacional. Actualment té més de 3000 patins en el seu sens i desenvolupa la seva activitat com a principal encarregada d'organitzar i promocionar el món del patí a vela. Sobretot actua a nivell europeu, però ha arribat a promocionar aquest esport fins i tot a Nova Zelanda.

Un altre àmbit d'actuació clar és la reglamentació de tots els aspectes tècnics relacionats amb el món del patí a vela. Per això, existeixen plànols de les dimensions i toleràncies que han de complir els patins a vela per assegurar la seva forma durant la construcció. Així mateix, estipula tota la normativa referent a les regates i al patí a vela de competició, per unificar criteris i crear una uniformitat entre totes les proves realitzades arreu del món.

Per últim, cal destacar que aquesta associació organitza tot tipus d'activitats relacionades amb el patí a vela per tal de prolongar el llegat cultural d'aquest magnífic esport i estendre'l arreu del món. Per això convoca travessies, exposicions, activitats de promoció lúdiques, crea escoles de vela... L'ADIPAV és una de les associacions nàutiques espanyoles més antigues i amb més activitat del territori.

### 3.3. Normativa

Durant els inicis del patí a vela, es navegava per pur plaer, sense restriccions ni normes que regissin les embarcacions. Amb l'aparició de les regates es van anar creant a poc a poc regles bàsiques que es transmetien de forma oral entre patrons. Finalment, amb la creació de l'ADIPAV, es va elaborar la primera normativa escrita, publicada en forma d'acta de les reunions de l'associació. Aquesta definia les principals regles de les regates d'aquells temps (sortida des de la platja, recorregut i arribada a la platja novament) i les línies d'aigua dels flotadors a partir de seccions per a la seva correcta construcció. Al llarg dels anys aquesta normativa ha anat evolucionant d'acord amb les millores progressives tant de forma de l'embarcació com de la manera en què es realitzen les competicions, sent reescrita en un nou reglament redactat el 1992. El 2004 es va realitzar una nova adaptació a causa de les noves tecnologies constructives (sobretot pel que fa a la nova generació de patins de fibra), però la geometria del patí a vela no es va veure gaire modificada.

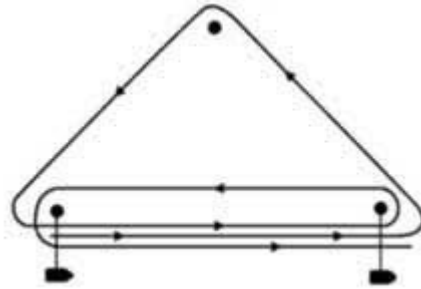
#### 3.3.1. Dos normatives

Pel que fa a la normativa actual vigent, es divideix en dues parts molt clares:

- Regles de regata: formada per totes les normes relacionades amb l'organització i desenvolupament de les competicions, tant nacionals com internacionals.
- Reglament de construcció: engloba totes les normes i característiques en l'àmbit constructiu que ha de complir el patí a vela.

Pel que fa a la normativa de regata, té un ampli àmbit de regulació, ja que desenvolupa des de la logística dels organitzadors fins a l'actuació dels patrons durant les competicions. El recorregut de les regates és un dels punts més importants de la normativa, ja que és de compliment obligatori a nivell nacional i internacional, i és l'expressió més clara d'unificació entre clubs i aficionats als patins a vela. Aquest es basa en un recorregut anomenat triangle

olímpic, un triangle equilàter en el qual un dels seus costats és el tram de cenyida (amb la vela en la direcció del vent), i els altres dos costats corresponen amb els “llargs” (direccions més favorables de navegació, amb el vent gairebé perpendicular a la vela, una mica inclinat des de la popa). Les condicions mínimes de vent per donar una sortida ha de ser de 4 nusos i la màxima de 22 nusos.



*Figura 3.2 Recorregut d'una regata de patí a vela [2]*

### 3.4. Forma de l'embarcació

Aquest capítol forma part de la normativa, i es podria definir com l'apartat clau, ja que estipula les dimensions i toleràncies que han de complir les embarcacions per tal de poder ser considerades patins a vela i poder formar part en competicions. El patí a vela és un catamarà monotip construït sota aquest reglament, l'objectiu del qual és fer el més similar possible les característiques que afecten la velocitat i maneigament entre totes les embarcacions. A grans trets, es defineix el patí amb les següents característiques:

- Eslora de 5,60 m.
- Màniga de 1,60 m.
- Màstil de fusta o alumini de 6,80 m.
- Pes mínim de 98 kg.
- Vela tipus “Marconi” de 12,60 m<sup>2</sup>.
- Flotadors simètrics respecte la línia de crugia.
- Unió entre flotadors per 5 bancades.
- Construcció del cos en fusta o fibra.

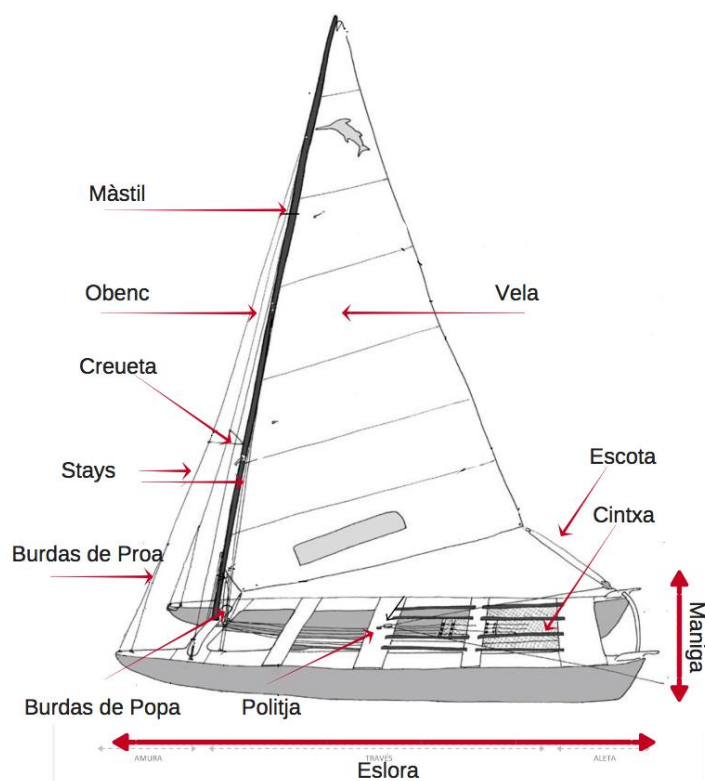


Figura 3.3 Parts d'un patí a vela [3]

El reglament reuneix un seguit de plànols i models en 2D i 3D amb l'objectiu de definir de la forma més clara possible totes aquestes dimensions i característiques geomètriques. Pel que fa al desenvolupament d'aquest projecte, és de vital importància els que fan referència directe als flotadors i al cos en general del propi patí a vela, ja que és la referència des d'on es parteix per intentar realitzar una millora de les característiques hidrodinàmiques. Es disposa del plànol del flotador del patí a vela (Annex 1), que defineix 11 seccions al llarg de l'eslora per tal de definir de forma acurada les línies d'aigua. Es proporcionen les mesures característiques de les seccions perpendiculars del flotador: l'alçada de secció, la màniga total, la màniga de la quilla, l'alçada de quilla i el radi de curvatura de quilla.

### 3.5. Construcció

Des dels seus inicis, la construcció dels patins a vela ha patit una enorme transformació, perfeccionant les tècniques usades, el temps emprat i la qualitat obtinguda. Tot i això, s'ha mantingut sempre com una construcció artesana, inclús a dia d'avui. Així doncs, com s'ha pogut garantir les dimensions i toleràncies exigides per l'ADIPAV? Ha sigut possible gràcies a la fabricació en sèrie del patí català, un procés creat pe Antoni Soler, un constructor de les platges de Badalona, el 1971. De forma genèrica, el procés es caracteritza per la utilització d'uns motlles de fusta sobre els quals es va donant forma a l'embarcació. Un cop es tenen

totes les peces necessàries es procedeix al muntatge i a les fases d'acabat per aconseguir la millor qualitat possible. Actualment només existeix un constructor de patins de fusta, anomenat Ramón Huertas, que segueix emprant la mateixa tècnica i motlles amb els quals s'han construït més de 1600 patins.

### 3.5.1. Procés constructiu

La construcció del patí a vela comença per la seva eina bàsica de funcionament: els flotadors. Es fabriquen, com és d'esperar, amb els motlles creats per Antoni Soler. Primerament s'introdueix en aquest motlle el forro i la fusta que donarà forma i estanqueïtat a les quilles, unint-les amb cola aerodux. Tot seguit es col·loquen les 17 quadernes que creen els 18 compartiments en els que es divideix cada flotador i que, alhora, ajuden a donar la forma definitiva d'aquests al pressionar contra el motlle. Un cop s'ha assecat la cola que ho uneix tot, es dona una capa amb fons de poliuretà per l'interior, amb l'objectiu de garantir l'estanqueïtat de cada compartiment i protegir l'embarcació en cas de col·lisió.

A continuació, es procedeix a preparar la coberta i la contraquilla que s'han d'encolar al flotador. Per aconseguir que sigui completament estanc s'utilitza un altre motlle anomenat "vaca". Posteriorment es retalla el material sobrant i es lima tota la superfície per eliminar qualsevol imperfecció.

Després d'un mínim de 7 dies, per deixar que el flotador reposi i s'acomodi, es passa a la fase de pintura. El motiu pel qual es pinta el flotador és simple: l'okume, que és la fusta emprada per a la seva construcció, és molt porosa. Així doncs, a força de fer capes alternades de pintura amb base de poliuretà i de massilla amb polièster per tapar imperfeccions s'aconsegueix una elevada resistència als efectes de l'aigua salada i el sol. També es realitza aquest procés amb les altres parts de l'embarcació, però el flotador és la zona que més pateix degut a les forces, el contacte constant amb l'aigua i els canvis bruscos de temperatura.

Una setmana més tard, en la que es deixa que s'assequi la pintura per complet, es procedeix a la unió dels dos flotadors a través les bancades. Totes elles tenen una geometria pròpia pel fet que estan dissenyades per suportar diferents forces segons la zona del patí a on es troben. Es fabriquen a base de tires de dues fustes: la fusta d'ayous i la fusta de samanguila. Aquesta combinació, unida amb cola de tipus araldit, proporciona una gran resistència mecànica i unes característiques òptimes a cadascuna de les bancades.

Per últim, es fabrica el màstil de fusta o alumini que permet elevar la vela fins a un màxim de 6,79 metres. Es fixen tots els mecanismes necessaris pel maneigament de la vela, com la barra d'escota, els aparells d'escota, les drisses... Per finalitzar es dona un elevat nombre de capes de vernís a tot el patí per protegir la fusta dels efectes adversos de l'aigua, el sol i la intempèrie.

## **4. Dinàmica de fluids**

### **4.1. Introducció a la dinàmica de fluids**

El funcionament del patí a vela està condicionat pels dos medis que interaccionen amb ell: l'aire i l'aigua. Cadascun d'ells afecta de forma diferent a l'embarcació, sent l'aire la font de la força d'impulsió, i l'aigua la causant de la sustentació del patí i una de les principals raons responsables de la limitació de velocitat.

La interacció entre els flotadors i l'aigua és crítica en el funcionament de patí. Al no disposar de timó ni quilla, és l'únic element de contacte amb l'aigua que el permet desplaçar-se i controlar la seva direcció. Aquesta interacció depèn de molts factors, tals com les propietats geomètriques del flotador, la densitat i viscositat del fluid, la velocitat i altres condicions de funcionament... A través de la dinàmica de fluids, o hidrodinàmica, es pot estudiar.

En aquest projecte, la dinàmica de fluids és l'eina principal amb la qual s'analitza el comportament dels flotadors estàndards definits per l'ADIPAV. Alhora, és també l'eina principal amb la qual es vol crear una nova geometria per millorar el funcionament de l'embarcació i buscar un model més òptim. Abans però, cal introduir alguns conceptes per poder comprendre els raonaments i processos duts a terme al llarg del projecte.

### **4.2. Números adimensionals**

La gran dificultat de resolució de les equacions que descriuen els problemes de la dinàmica de fluids fa que sigui extremadament complex obtenir solucions de forma analítica. Per aquest motiu, el mètode més utilitzat per obtenir resultats a problemes és l'anàlisi dimensional.

L'anàlisi dimensional és una eina que permet reduir les variables que intervenen en un model agrupant-les en números adimensionals. Aquests, tal com indica el seu nom, són números sense unitats físiques però que mostren de forma simplificada unes condicions, característiques o resultats específics d'un determinat estudi. A la pràctica, aquests nombres serveixen per extrapolar resultats obtinguts experimentalment a situacions on canviïn les característiques geomètriques, cinemàtiques, dinàmiques, propietats del fluid... A part, amb les lleis d'escala i similitud, és molt fàcil realitzar càlculs sobre prototips de grans dimensions fent un model de geometria petita i assimilant les condicions amb anàlisi dimensional.

Existeixen molts números adimensionals, però cadascun d'ells representa unes característiques físiques diferents. Per tant, a continuació es mostren els més rellevants pel que fa a l'estudi realitzat en aquest treball.



#### 4.2.1. Nombre de Reynolds

El nombre de Reynolds (Re) és el nombre més utilitzat en dinàmica de fluids. Estableix una relació entre les forces inercials i les tensions viscoses del fluid. A efectes pràctics, permet veure si el flux es troba en regim de flux turbulent o de flux laminar. La fórmula amb la que es defineix és la següent:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu}$$

(Ec. 4.2.1.1)

On  $\rho$ : Densitat del fluid.

U: Velocitat del fluid.

L: Longitud característica del sistema.

$\mu$ : Viscositat del fluid.

Si el nombre de Reynolds és elevat (per sobre dels  $8 \times 10^5$ ) el flux és turbulent, és a dir, les tensions viscoses són molt petites enfront de les forces inercials. Es dona en general quan el fluid és poc viscos o va a altes velocitats. En cas de tenir un nombre baix (per sota dels  $2 \times 10^5$ ) el flux és laminar.

#### 4.2.2. Nombre de Froude

El nombre de Froude (Fr) relaciona l'efecte provocat per les forces inercials i les forces gravitacionals que actuen sobre un fluid. Proporciona informació sobre el comportament d'una superfície lliure, com la del casc d'un vaixell en contacte amb un flux fluid. S'expressa amb la fórmula següent:

$$Fr = \frac{U^2}{g \cdot L}$$

(Ec. 4.2.2.1)

On U: Velocitat del fluid

g: acceleració de la gravetat

L: paràmetre de longitud



#### 4.2.3. Coeficient de sustentació

El coeficient de sustentació ( $C_L$ ) és un coeficient que refereix al comportament hidrodinàmic de sustentació del perfil estudiat. Relaciona la força de sustentació amb la densitat del fluid, la velocitat del flux i la superfície que intervé en la interacció. Aquest coeficient depèn del nombre de Reynolds, el nombre de Mach i de l'angle d'atac del perfil que s'estudia. Es calcula amb la fórmula següent:

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot U^2 \cdot S}$$

(Ec. 4.2.3.1)

On  $\rho$ : Densitat del fluid.

U: Velocitat del fluid.

$F_L$ : Força de sustentació.

S: Superfície.

A efectes pràctics permet preveure el comportament hidrodinàmic de sustentació del cos estudiat. Aquest es deu bàsicament a la diferència de pressions entre les zones del cos a causa del flux.

#### 4.2.4. Coeficient de resistència a l'avanç

El coeficient de resistència a l'avanç o de *drag* ( $C_D$ ) és anàleg al de sustentació, però refereix a les forces que s'oposen a l'avanç del flux. S'expressa amb la fórmula següent:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot U^2 \cdot S}$$

(Ec. 4.2.4.1)

On  $\rho$ : Densitat del fluid.

U: Velocitat del fluid.

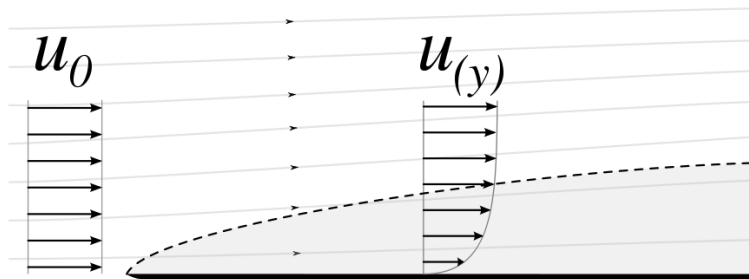
$F_D$ : Força d'arrossegament.

S: Superfície.

De forma similar al coeficient de sustentació, aquest permet fer una anàlisi sobre el comportament de la resistència a l'avanç del fluid a causa de la geometria del cos, provocat per les diferències de pressions i per les forces de fregament.

### 4.3. Model capa límit

Un flux que incideix sobre un cos genera una interacció amb la seva superfície a causa de la condició de no lliscament, per la qual les partícules fluides en contacte directe amb la susdita superfície tenen una velocitat relativa forçada de valor zero. Com les partícules que es troben més allunyades del cos no es veuen afectades per aquesta condició, es generen uns gradients de velocitats en conseqüència de les forces tallants o viscoses entre cada capa de fluid. A aquesta regió se l'anomena capa límit, i es caracteritza per una distribució de velocitat no uniforme. Aquesta té una amplada o gruix que evoluciona al llarg del cos, i és denominada amb la lletra  $\delta$ . Cal destacar que la capa límit té efectes importants sobre l'estudi de cossos o perfils aerodinàmics, a causa de les forces viscoses que crea o a altres possibles efectes que pot desenvolupar, com el desprendiment de la capa límit.



*Figura 4.1 Capa límit en una placa plana [4]*

El desprendiment de la capa límit és un fenomen característic provocat per un gradient advers de pressions sobre el flux fluid. És típic de perfils aerodinàmics per les diferències de pressions que apareixen entre diferents zones del cos, mentre que en plaques planes no es dona a causa de la no variació de la pressió al llarg del flux (a no ser que es forci). Les línies de corrent es separen del cos i provoquen una pèrdua d'energia cinètica del flux.

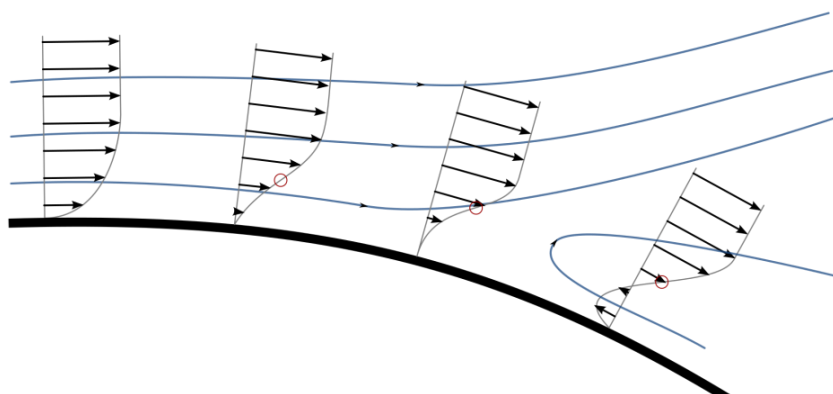


Figura 4.2 Despreniment de capa límit en un perfil [5]

## 4.4. Forces de Lift i Drag

Aquestes dues forces són la principal base de l'estudi realitzat en aquest projecte, ja que el lift refereix directament a la força de sustentació que ajudarà i complementarà a la força d'Arquímedes per mantenir l'embarcació a nivell de l'aigua, i el drag a la força de frenada dels flotadors a causa de la interacció amb el flux. A continuació es defineixen aquestes dues forces i s'observa la correlació entre elles.

### 4.4.1. Força de Lift o de sustentació ( $F_L$ )

Aquesta força té una direcció perpendicular al moviment del cos estudiat. Es relaciona de forma directa amb el coeficient de sustentació ( $C_L$ ). L'aparició d'aquesta es regeix segons l'equació de Bernoulli i el teorema de conservació de la massa. Per comprendre com funciona, s'explica amb un perfil d'ala en 2 dimensions, ja que és l'exemple pràctic per excel·lència de les forces de sustentació.

Els perfils d'ala són perfils asimètrics: normalment la part superior de l'ala té un major gruix que la part inferior. Si es sotmet a un flux i es porta a estat estacionari es compleix el teorema de conservació de la massa, pel qual el caudal d'entrada i de sortida en un volum de control on es trobi el perfil ha de ser el mateix (sempre que es tracti d'un flux incompressible). Dues partícules que entrin a la vegada en el volum de control, considerant que una vagi per una línia de corrent per la part superior de l'ala i l'altre per la part inferior, han de sortir a la vegada del susdit volum. Com la part superior té una major dimensió, la partícula ha de recórrer una distància major en el mateix temps que la inferior, és a dir, patirà una acceleració al llarg del perfil incrementant així la seva velocitat. En conseqüència, tal com explica l'equació de Bernoulli, apareixen gradients de pressió en les diferents zones de l'ala: a elevades velocitats augmenta l'energia cinètica i disminueix la pressió o inclús es pot fer negativa, mentre que en les zones de baixa velocitat i en el punt d'estancament disminueix l'energia cinètica i la pressió

augmenta de forma pronunciada. A causa d'aquestes diferències de pressions es crea una força de sustentació que, en el cas dels avions per exemple, en unes condicions favorables de l'angle d'incidència (s'explica en profunditat l'angle d'atac en l'apartat 4.4.3) i de la velocitat del fluid és capaç d'aixecar el seu pes. S'observa la distribució de pressions i la força de sustentació en la Figura 4.3 i 4.4 respectivament.

#### 4.4.2. Força de drag o resistència a l'avanç

Aquesta força té una direcció paral·lela però en sentit oposat a la velocitat del cos estudiat. Es pot observar en la Figura 4.4. Es relaciona de forma directa amb el coeficient de resistència a l'avanç ( $C_D$ ). L'aparició d'aquesta es deu a dos motius: les forces de fregament i els gradients de pressió que apareixen en el perfil.

Les forces de fregament són provocades per la interacció viscosa del fluid en contacte amb el cos, causades per la condició de no lliscament. Pel que fa a les forces creades pel gradient de pressions, es generen bàsicament per l'estela que apareix a la part posterior dels cossos o perfils. Aquesta s'engendra quan es desprèn la capa límit en la geometria. Per a disminuir les forces de resistència d'un cos interessa que, en la mesura del possible, es redueixin les forces degudes a l'estela, ja que tenen un efecte molt més perjudicial que les de fregament. En el cas dels perfils d'ala com l'emprat en l'exemple de les forces de lift, la modificació de l'angle acostuma a tenir conseqüències adverses pel que fa al coeficient de drag. A partir d'un cert punt, l'estela creada és tan gran que perd les característiques de drag i lift de forma sobtada. Aquest efecte s'anomena entrada en pèrdua i s'estudia en profunditat en l'apartat 4.4.4.

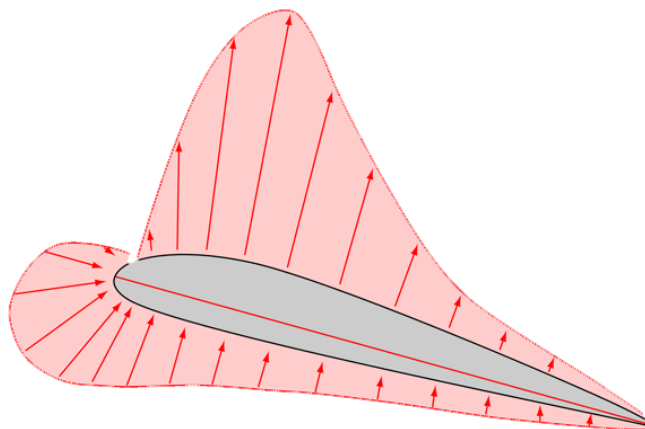


Figura 4.3 Distribució de pressions en un perfil d'ala [6]

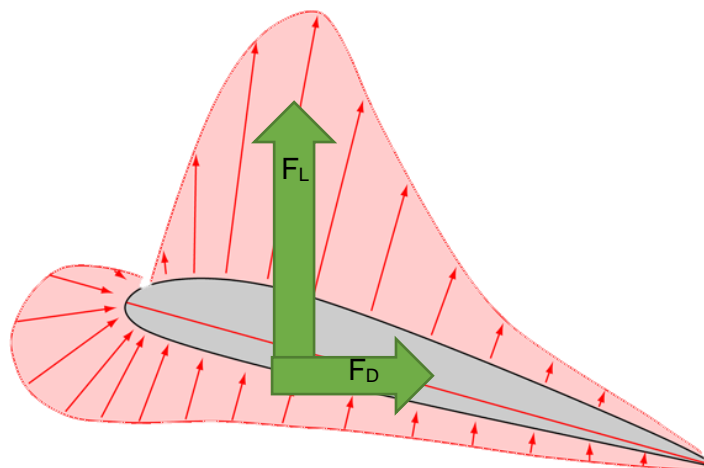


Figura 4.4 Forces de drag i lift

#### 4.4.3. L'angle d'atac

L'angle d'atac ( $\alpha$ ) d'un perfil de tipus ala refereix a l'angle entre la velocitat del flux i la corda del perfil, que és la línia recta que uneix els dos extrems d'aquest. Per a cada angle la interacció amb el cos es veu modificada, alterant les línies de corrent, les velocitats i les pressions de cada zona. En conseqüència, aquest esdevé un paràmetre característic de cada perfil, que modifica els seus coeficients de sustentació i resistència a l'avanç. Es pot emprar per aconseguir unes característiques desitjades en un cert perfil, però normalment acostumen a tenir un punt òptim on el  $C_D$  i el  $C_L$  s'equilibren oferint unes prestacions de màxima sustentació amb mínima resistència d'avanç, anomenat rendiment màxim.

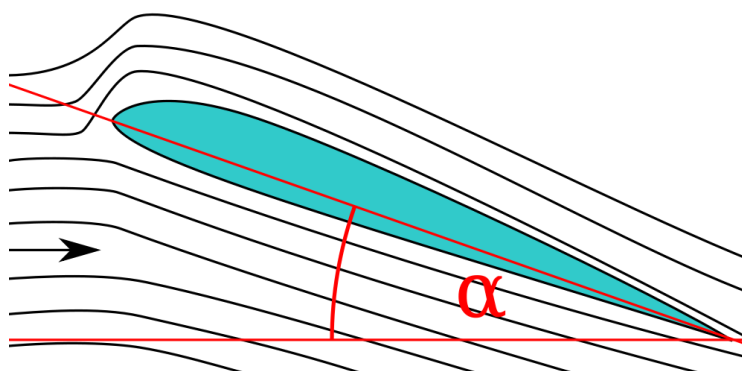


Figura 4.5 Angle d'atac en un perfil d'ala [7]

#### 4.4.4. Entrada en pèrdua

Un perfil alat ofereix prestacions diferents de sustentació depenent de l'angle d'atac al qual es troba sotmès, tal com s'ha dit anteriorment. Tot i això, existeix una limitació de funcionament degut a una pèrdua sobtada de les propietats hidrodinàmiques a causa d'un angle crític

característic de cada perfil. A partir d'aquest valor, el perfil desprèn la capa límit suprimint la capacitat sustentadora per la desaparició de la depressió de la part superior del perfil, i augmentant dràsticament el coeficient de resistència a l'avanç, en conseqüència de la gran estela creada. Es pot observar aquest efecte en la Figura 4.6.

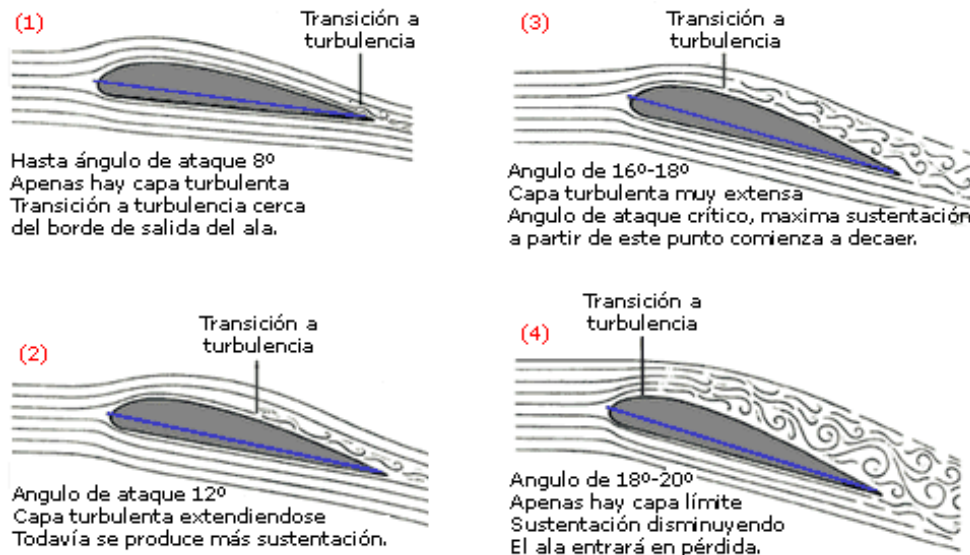


Figura 4.6 Increment d'angle d'atac i entrada en pèrdua [8]

## 4.5. Perfils hidrodinàmics: l'hydrofoil

Un hydrofoil és una superfície amb perfil d'ala que treballa en un medi aquàtic amb l'objectiu principal de crear una força sustentadora. Es caracteritza pel seu perfil de secció, el qual determina el seu comportament. L'objectiu bàsic d'aquest dispositiu en una embarcació és elevar-la en unes condicions determinades, reduint així les forces de resistència a l'avanç que actuen sobre el casc. D'aquesta forma es poden aconseguir velocitats més elevades i reduir a la vegada el capcineig provocat per les ones, proporcionant una major estabilitat durant el seu maneig.

Un hydrofoil es defineix segons les seves característiques geomètriques. Els seus paràmetres característics i diferents zones es mostren en la Figura 4.7.

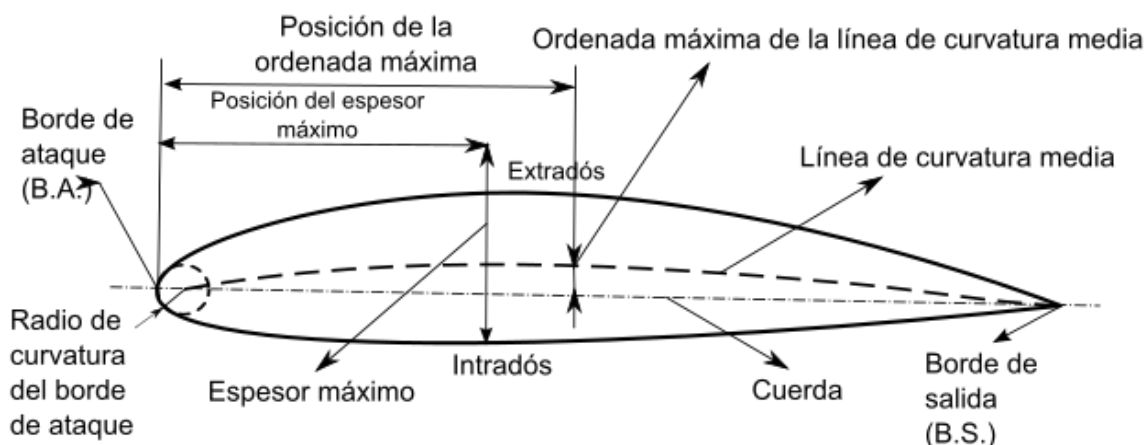


Figura 4.7 Parts d'un perfil d'ala o d'hydrofoil [9]

Les parts superior i inferior del perfil s'anomenen extradós i intradós respectivament. Les dimensions d'aquestes dues zones determinen les diferències de velocitats del flux i, en conseqüència, les diferents pressions que creen la força de sustentació. És per això que en un hydrofoil l'extradós té una distribució de pressions negativa i l'intradós positiva.

La vora que queda enfrontada al flux és l'anomenat caire d'atac. La seva geometria afecta de forma directa al rendiment del perfil. Un disseny és més eficient com major és el rang d'angles d'atac pels quals no entra en pèrdua.

El costat oposat s'anomena vora de sortida, i el seu objectiu principal és reunir les línies de corrent provinents de l'extradós i de l'intradós. Un bon disseny d'aquesta zona és vital per a reduir la resistència a l'avanç del perfil i augmentar la sustentació.

Existeixen una sèrie de paràmetres geomètrics per determinar les característiques d'aquestes zones:

- **Corda**: correspon a la línia recta que uneix les vores d'atac i sortida. És un dels paràmetres més importants del perfil, ja que és la dimensió característica de l'hydrofoil, i s'utilitza directament en l'estudi de sustentació del perfil: la força de lift és proporcional a l'àrea projectada de l'hydrofoil.
- **Línia de curvatura mitjana**: Aquesta línia és equidistant entre l'extradós i l'intradós. Comparant-la amb la corda es pot observar el tipus de curvatura del perfil i deduir el caràcter hidrodinàmic del cos. Pot definir curvatures positives, negatives, de doble curvatura o inclús sense curvatura. En el cas dels hydrofoils es sol treballar amb curvatures positives.
- **Gruix**: refereix a la distància màxima entre l'extradós i l'intradós. Normalment es sol representar amb el terme "Thickness", que és el gruix o espessor representat en tant per cent respecta la corda.
- **Curvatura màxima o "Camber"**: és el punt de distància màxima entre la línia de curvatura mitjana i la corda. També es sol presentar com un percentatge respecta la corda del perfil.

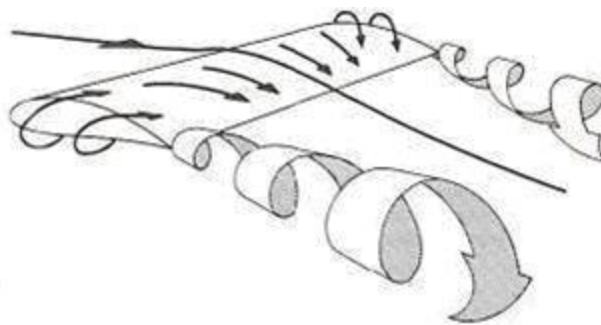
- Radi de curvatura de la vora d'atac: com ja s'ha dit anteriorment, és un paràmetre geomètric que influeix de forma molt pronunciada en el comportament d'entrada en pèrdua del perfil. També es sol referenciar amb un valor percentual de la corda. Quan aquest és molt petit es diu que el caire d'atac és molt agut, i sol provocar un desprendiment de la capa límit. En el cas dels hydrofoils, s'usen caires d'atac entre un 2% o un 3%.

Com que es poden modificar tant com es vulgui aquests paràmetres esmentats, existeixen un elevat nombre de perfils d'hydrofoil. Tots ells proporcionen característiques diferents que poden ser més o menys adequades a l'ús que es vulgui fer. Cal dur a terme un procés de selecció per determinar la forma més adient en cada cas.

#### 4.5.1. Força de resistència a l'avanç induïda

Els hydrofoils presenten una problemàtica suplementaria que augmenta les forces de resistència a l'avanç que actuen sobre el cos. La resistència a l'avanç induïda apareix a la punta de l'hydrofoil i consisteix en la creació d'un vòrtex degut a la diferència de pressions entre l'extradós i l'intradós.

El motiu pel qual succeeix aquest fenomen és que les partícules del fluid comencen a desplaçar-se de l'intradós cap a l'extradós per compensar les depressions que apareixen a aquest últim. A mesura que el flux s'apropa a la vora de sortida aquest fet es veu accentuat, creant finalment un vòrtex a la punta de l'hydrofoil. Es pot observar aquest efecte a la Figura 4.8.



*Figura 4.8 Efecte de la resistència d'avanç induïda [10]*



## 5. Modelització i estudi de geometria del flotador actual

El flotador tradicional del patí a vela es va dissenyar de forma artesanal, sense cap tipus d'estudi hidrodinàmic de les seves característiques, basant-se simplement en els coneixements dels constructors que van participar en el seu desenvolupament. Per això es vol estudiar i conèixer amb exactitud el seu comportament per poder proposar una millora. En aquest apartat s'explica com s'ha realitzat aquest estudi i els resultats obtinguts.

### 5.1. Condicions de simulació: Consideracions a tenir en compte

Abans de generar els models de simulació per conèixer com es comporta el flotador, cal tenir en compte una sèrie de consideracions que afecten la realització de l'estudi. Aquestes es deuen al fet de que les condicions en les quals un patí a vela navega són molt diverses i depenen de molts factors externs. Cal simplificar els models:

- Onatge: El patí a vela normalment s'utilitza en el mar, tot i que pot ser manejat també en llacs. Així doncs, l'onatge afecta en la interacció entre l'aigua i el cos, ja que no es tracta d'una velocitat uniforme ni en el temps ni en l'espai. Això també altera l'àrea que es troba en contacte amb el fluid pels canvis que pateix la línia de flotació. Per tal de poder realitzar l'estudi de forma correcta, es trien unes condicions favorables de navegació, amb un onatge molt reduït per poder considerar negligibles els efectes que tingui sobre el flotador.
- Direcció del vent: La direcció en la qual incideix el vent a la vela, tot i no ser objecte d'estudi directe en aquest treball, influeix de forma notòria les condicions en les quals navega el patí. Una regata, tal com s'ha explicat anteriorment, té un recorregut de triangle equilàter anomenat triangle olímpic, en el qual un dels costats correspon a la cenyida i els altres dos als llargs. Els llargs són els trams més favorables d'aprofitament de la força de vent, que impacta de forma gairebé perpendicular a la vela, una mica inclinat des de la popa, obtenint les velocitats més elevades possibles. Per aquest motiu, es considera que es realitza l'estudi del flotador i de la seva millora en aquestes condicions de navegació, ja que és el moment de la competició on les característiques hidrodinàmiques del flotador poden marcar la diferència.

Tenint això en compte, es va fer una petita anàlisi de les característiques de navegació en aquestes condicions per observar com caldria fer el model de simulació. Es va realitzar un estudi a través del coneixement propi de navegants i de documentació gràfica, tal com vídeos i fotografies. Es va poder treure dues conclusions que afecten directament al model de simulació:

- Inclinator del patí: Degut al moment creat per la component horitzontal de la força exercida per la vela sobre l'embarcació, el patí acostuma a navegar escorant, és a dir, inclinat segons l'eix de la línia de crugia. Aquesta força es contraresta amb el pes del propi tripulant, que pot arribar a treure gran part del seu cos fora del patí, controlant

així la inclinació. Aquesta condició de navegació permet un aprofitament elevat de la força del vent i, a la vegada, minimitza la força de fregament del patí amb l'aigua al reduir l'àrea de contacte a un sol flotador. Habitualment es sol inclinar el patí entre 25 i 35 graus aproximadament. Al ser un paràmetre controlable pel tripulant, es fixarà per a la simulació un angle de 30 graus.



*Figura 5.1 Patí a vela escorant [11]*

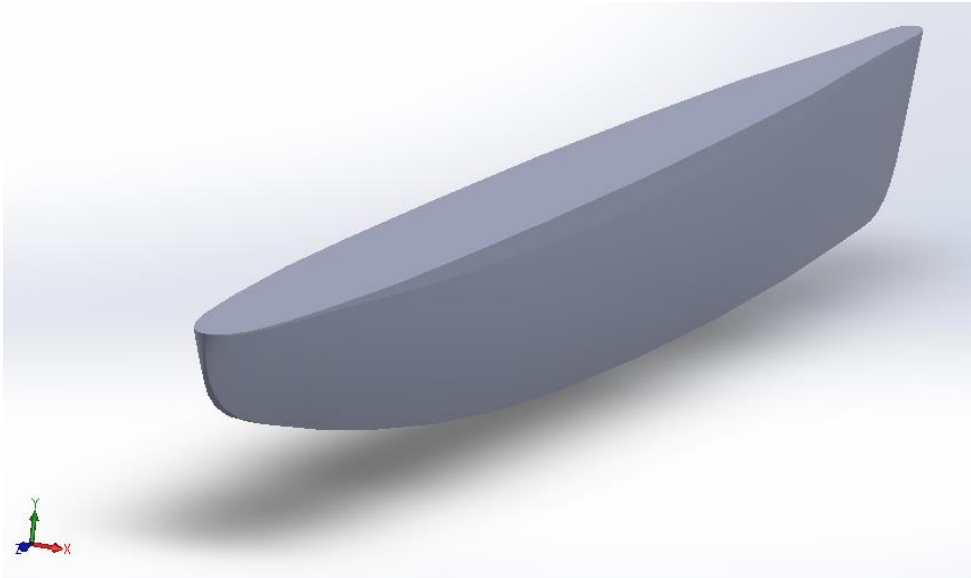
- Velocitat: és evident que aquesta característica depèn de forma directa de la velocitat del vent durant la navegació, tot i que pot ser controlada pel tripulant amb diferents maniobres. És per això que aquest estudi no es limita a una única velocitat de funcionament, sinó que es realitza per a un rang de valors, establint uns límits de 2 m/s com a velocitat mínima i 8 m/s com a velocitat màxima.
- Pes del conjunt: És difícil establir un pes exacte pel conjunt format pel patí a vela i el seu tripulant, en especial perquè la fusta, en mullar-se, augmenta el seu pes. Tot i dedicar grans esforços durant el procés constructiu perquè cada part del patí sigui completament estanca i reduir la porositat superficial a base de vernís i pintura, és inevitable que l'aigua interfereixi en les característiques de pes. Aquest fet s'accentua amb el pas dels anys, a l'aparèixer imperfeccions en el cos. Tenint en compte que la massa mínima establerta per normativa, sense vela ni màstil, ha de ser de 98 kg, i considerant una massa mitjana dels tripulants entorn dels 80 kg, es pot estipular que el conjunt ronda entorn els 200 i els 250 kg. Al no ser un valor rigorosament exacte, serveix per veure si les forces que sustenten el patí tenen un sentit físic realista o no.
- Distribució de pesos: la distribució del pes al llarg de l'embarcació afecta de forma considerable la manera en la qual interacciona el patí amb el mar, sobretot per culpa de l'onatge. Si el casc acumula un major pes en els extrems tindrà tendència a balancejar-se a causa del moviment de les onades, fent inclús que es pugui submergir per complet la punta del flotador i frenant l'embarcació. Es comporta molt millor si disposa d'un pes concentrat en el centre. Una normativa establerta per l'ADIPAV el 2004 estipula un moment d'inèrcia mínim de 260kg/m<sup>2</sup> respecte la línia de través per eliminar desavantatges dels patins amb una mala distribució. Per altra banda, el tripulant usa el seu propi cos per modificar aquesta distribució segons el seu interès i maniobrar el patí. En el cas dels llargs, es pretén mantenir una trajectòria rectilínia i el tripulant, simplement, busca controlar la inclinació a l'escorar,

tal com s'ha dit anteriorment. Per aconseguir-ho, es situa en posició de barlovento, entre el centre i popa del patí, i treu el cos parcialment fora de l'embarcació, amb la intenció de controlar el moment que crea respecte la línia de crugia. Per tenir aquesta consideració en compte a l'hora de fer la simulació es fixa una inclinació de 2 graus respecte la línia de través. D'aquesta manera es simula d'una forma el més acurat a la realitat possible les condicions de navegació actuals.

Com a curiositat, cal dir que per nivells de vent molt reduïts el tripulant es sol situar a sotavento, amb l'objectiu de fer escorar el patí i minimitzar l'efecte del fregament amb l'aigua. Tot i això, al ser una situació poc comuna en competició, no es tindrà en compte en aquest estudi.

## 5.2. Model de SOLIDWORKS

Per crear el model geomètric amb el qual s'ha realitzat la simulació s'ha utilitzat el programari SOLIDWORKS 2016 en versió estudiant. S'han fet els 11 croquis de les seccions dels plànols de l'ADIPAV (Annex 1) amb les dimensions estipulades. Un cop realitzat aquest pas, s'ha dibuixat la polilínia de la vista lateral de la proa del flotador per assegurar que entre el punt inicial i la primera secció dibuixada existeix una similitud exacta amb la realitat. A continuació s'han creat les diferents superfícies complexes que formen el patí a través de l'eina "recobrir superfície", que permet estipular com a referència les seccions que defineixen el cos, el punt inicial, el punt final i la directriu d'extrusió. Per últim s'ha generat un cos sòlid a partir del volum creat per les diferents superfícies, obtenint el model geomètric bàsic per començar el procés de simulació, mostrat en la Figura 5.2. Cal destacar que no s'ha aplicat ni el gir de 30 graus respecte la línia de crugia ni el de 2 graus respecte la línia de través degut a la complexitat que provocaria realitzar aquestes transformacions. Com es veurà a continuació, és molt més simple fer-ho amb el programa d'anàlisi del problema fluid. S'ha exportat l'arxiu en format IGES per a poder usar-lo.



*Figura 5.2 Model geomètric creat amb SOLIDWORKS*

A més a més, aquest programa permet saber amb exactitud l'àrea exterior del cos i el volum ocupat, de  $6,952 \text{ m}^2$  i  $0,46689 \text{ m}^3$  respectivament. Aquestes dues dades s'utilitzen per realitzar els càlculs de forces involucrades en el model.

### 5.3. Model de ANSYS Fluent (CFD)

El programa emprat per estudiar el problema hidrodinàmic que s'intenta resoldre en aquest treball ha sigut l'ANSYS WORKBENCH versió 18.2 amb llicència d'estudiant. En particular, s'ha usat l'ANSYS Fluent, un programa que permet resoldre problemes de dinàmica de fluids a través de la simulació amb mètodes numèrics. Aquest tipus de programari es defineix amb les sigles CFD (Computational Fluid Dynamics). És una eina amb gran flexibilitat que proporciona uns resultats fiables per al caire d'estudi que s'ha realitzat. A través de la discretització del domini utilitza algorismes per a simular problemes relacionats amb el moviment de fluids.

Els programes de CFD com el fluent es divideixen en tres etapes molt diferenciades:

- Pre-procés: comprèn tots els passos previs a la resolució del problema i és determinant per a l'exactitud dels resultats que es vulguin obtenir. Primer es genera la geometria del cos estudiat i el límit de la regió de l'espai on es realitzarà la simulació. A continuació es genera el mallat, és a dir, la discretització de l'espai creant els elements i nodes emprats per fer els càlculs. Com més fi o refinat és el mallat, més precís és el resultat numèric obtingut, però en contraposició major és el temps de càlcul del programa. Cal destacar que, al tractar-se d'una versió d'estudiant, existeix una limitació d'uns 500.000 elements que cal no sobrepassar per poder obtenir els resultats. Per últim, és necessari escollir el problema a

tractar, les condicions de contorn i els diferents paràmetres dels quals depenen els resultats.

- Resolució: El programa resol el problema definit en el pre-procés a través d'un mètode iteratiu entre les diferents equacions de cada node partint d'uns valors inicials. Quan els residus, és a dir, les diferències entre les solucions de cada iteració, són suficientment petits es pot considerar que la solució ha convergit, obtenint el resultat final de la simulació. Aquest paràmetre el pot fixar l'usuari.
- Post-procés: En aquest moment es pot estudiar els resultats numèrics obtinguts. Cal destacar que els programes de CFD estan dotats d'eines d'anàlisi, tals com visualitzadors dels camps de velocitats, de les pressions del fluid, les línies de corrent...

### 5.3.1. Geometria del problema

Per començar, s'importa el model geomètric creat amb anterioritat al "Design Modeler" de l'ANSYS. A continuació se li apliquen les transformacions necessàries segons les condicions descrites en l'apartat de consideracions a tenir en compte per a la simulació, és a dir, un gir de 30 graus respecte l'eix de crugia i un de 2 graus en sentit horari respecte l'eix de través.

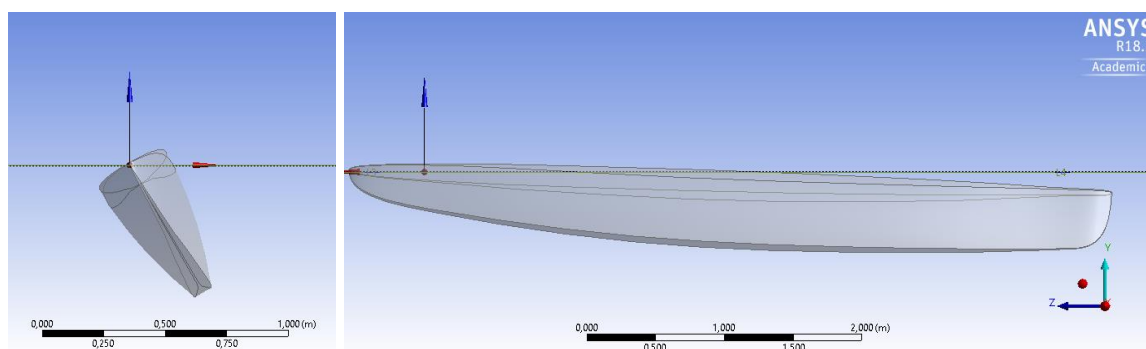
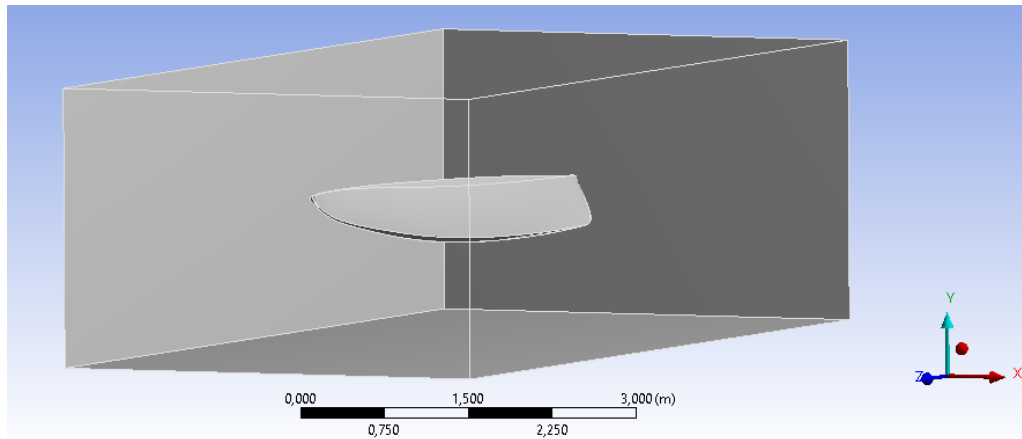


Figura 5.3 Model geomètric amb transformacions d'angle

Tot seguit s'ha creat un rectangle en el pla XZ i s'ha extruït ambdues direccions de l'eix Y per tal de crear el contenidor delimitant de la zona d'estudi del problema fluid. Cal destacar que s'ha fet prou petit per poder crear el màxim nombre de nodes possible prop del model, però lo suficientment gran per obtenir resultats coherents amb la realitat que tinguin en compte el comportament del fluid tant en la zona pròxima al cos com a la zona més allunyada. A continuació s'ha eliminat el volum ocupat pel flotador a través d'una operació booleana, creant un sol sòlid que correspon amb el volum d'estudi. Per últim s'han posat nom amb l'eina "named selection" a les diferents zones segons les condicions de contorn que caldrà aplicar-hi.

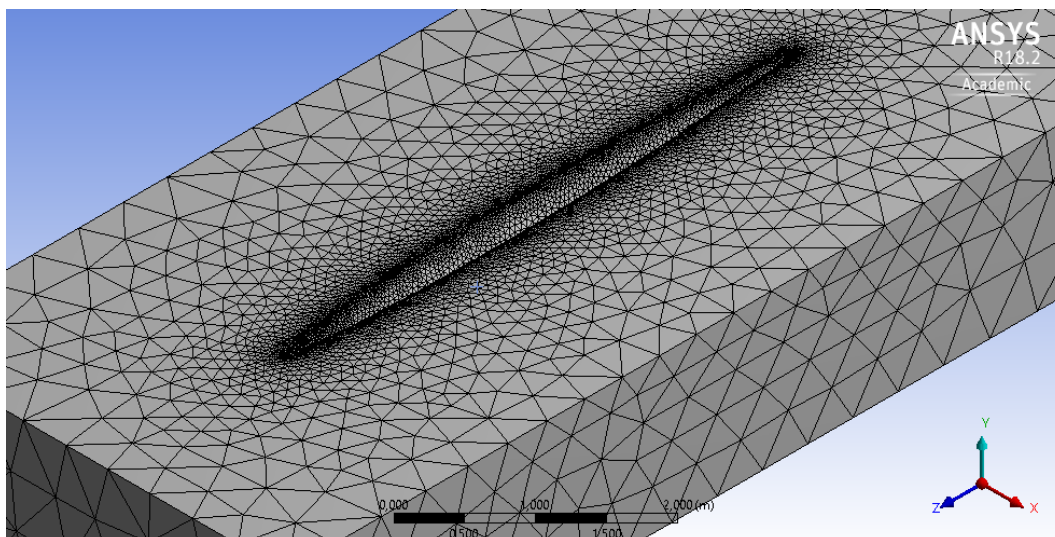
- Inlet: paret per on entra el flux a velocitat constant.
- Outlet: paret per on surt el flux.
- Border: parets laterals del contenidor.
- Flotador: parets que delimiten la geometria del flotador del patí.



*Figura 5.4 Flotador dins del domini d'estudi*

### 5.3.2. Creació del mallat

La creació del mallat, com ja s'ha dit anteriorment, és una de les parts crítiques de la resolució de problemes amb CFD, perquè la precisió dels resultats hi depèn de forma directa. Degut a la dificultat de tenir un model en 3D amb superfícies complexes i la limitació de nodes de la versió d'ANSYS amb llicència d'estudiant, és complicat generar un mallat fi que permeti obtenir una solució perfecta del model físic real. De totes maneres, s'ha fet un “mesh sizing” a les arestes que delimiten el flotador i s'ha anat variant aquest paràmetre fins a obtenir un elevat nombre d'elements proper al límit permès. Finalment s'ha obtingut un total de 84.816 nodes i 473.201 elements per a la simulació. La malla emprada és de forma triangular per adaptar-se millor a les superfícies complexes, en contraposició a una malla quadrada. Es mostra una secció del mallat definitiu en la figura 5.5.



*Figura 5.5 Secció del mallat del model flotador*



### 5.3.3. Configuració del problema amb fluent

Per resoldre el problema amb Fluent cal configurar els diferents paràmetres que regeixen les equacions del problema fluid. Amb el seguit de passos que es duen a terme en aquest apartat es completa el pre-procés i s'inicia la resolució del problema de forma iterativa.

S'ha definit el problema 3D en estat estacionari. A continuació s'ha escollit un model de turbulència K-Epsilon, que refereix al tipus de tractament de paret que es fa duran la resolució del problema (Near-wall treatment). Es tria aquest perquè correspon a una capa límit turbulenta amb un temps de càlcul petit i dues equacions per element. També es podria haver usat el model K-Omega. Tot seguit s'ha afegit el material "aigua" des de la base de dades del fluent per usar-lo com a fluid d'estudi del projecte. Aquest pas proporciona les característiques de l'aigua en el flux: viscositat, densitat... s'ha especificat la condició en l'apartat de "cell conditions". S'han definit les condicions de contorn de cada superfície creada en l'apartat de geometria:

- Inlet: es fixa un flux perpendicular d'entrada respecte a aquesta superfície. Tal com s'especifica en l'apartat de condicions de simulació, es realitzarà l'estudi entre uns rangs de velocitat entre 2 i 8 m/s.
- Outlet: s'especifica una condició de pressió constant de 0 Pa en la paret de sortida del flux. Així doncs es defineix un camp de pressions sense gradients forçats per l'entorn.
- Border: Com fa referència a les 4 parets que limiten la zona d'estudi, s'estipula una condició de contorn de paret en moviment amb velocitat relativa 0 respecte al flux del model. D'aquesta manera es crea una superfície sense esforços tallants, ja que va a la mateixa velocitat.
- Flotador: Al ser la superfície d'estudi s'especifica una condició de contorn de paret fixe. Es pot estudiar els esforços que pateix a causa del flux un cop realitzat el procés iteratiu de càlcul.

Fluent necessita uns valors de referència per començar les iteracions de forma que arribi a convergir. Són de vital importància per obtenir un resultat correcte. En el cas del flotador s'han especificat dues referències diferents segons els resultats d'interès a trobar:

- Per trobar el  $C_L$ : per obtenir aquest valor s'ha considerat la seva longitud característica com l'eslora del flotador, de 5,6 metres de llargada, i l'àrea de referència com l'àrea exterior del flotador proporcionada de forma exacta amb el SOLIDWORKS i amb un valor de 6,952 m<sup>2</sup>. Això es deu al fet que la força de sustentació es crea al llarg de tota la superfície del flotador a causa de les diferències de pressions creades en el perfil.
- Per trobar el  $C_D$ : Per determinar aquest valor s'ha especificat la longitud característica de la seva alçada màxima de  $5,45 \times 10^{-1}$  metres i una àrea de referència d' $1,5914 \times 10^{-1}$  m<sup>2</sup>, corresponent a l'àrea projectada aproximada de la seva secció de màximes dimensions. El motiu d'aquesta decisió es deu al fet que el comportament del flotador s'assimila al d'un cilindre, on l'àrea de la secció és la principal causant de les forces de resistència a l'avanç. Cal destacar que s'han realitzat un elevat nombre de proves amb diferents referències però

en tots els casos es van obtenir valors de coeficients extremadament petits, de l'ordre de  $10^{-4}$ , completament allunyats de la realitat. Un coeficient tant petit no s'obté ni amb un perfil d'ala, on es solen obtenir valors mínims de l'ordre de  $10^{-3}$  i en condicions molt específiques. Realitzant el càlcul d'aquesta manera es van arribar a resultats realistes més fidels al que caldria esperar del comportament d'una geometria com la del flotador.

Per últim s'han especificat els monitors de càlcul necessaris per obtenir els resultats d'interès durant la simulació. Per tant, s'han definit els coeficients de drag i de lift referents a la superfície "flotador" i s'ha habilitat l'opció perquè apareguin els valors en la finestra de resultats. A continuació s'ha realitzat una inicialització de tipus híbrida. En aquest punt, el programa ja està preparat per començar a iterar, és a dir, es dona per finalitzat el pre-procés.

#### 5.3.4. Simulació i procés iteratiu

S'han definit un límit de 1.000 iteracions i s'ha estipulat un valor de  $10^{-3}$  en els diferents residus de càlcul de cada iteració per a considerar que la solució ha convergit. D'aquesta manera, quan els valors de tots els residus és inferior a aquest nombre o quan s'arriba al límit d'iteracions permeses es considera que la solució és bona, proporcionant així els resultats finals d'interès per a l'estudi. Com ja s'havia dit anteriorment, s'ha realitzat diverses simulacions per a diferents velocitats entre els 2 m/s i els 8 m/s . En tots els casos la solució ha convergit al voltant de les 250 o 260 iteracions. En la Figura 5.6 es mostra l'evolució dels residus durant el procés iteratiu en el càlcul per a una velocitat de 5 m/s, on es pot observar que es troben tots per sota del  $10^{-3}$ . Les Figures 5.7 i 5.8 mostren l'evolució dels coeficients de lift i drag respectivament. Cal recordar que en cada cas s'ha establert una referència diferent d'àrea i longitud, necessitant un total de 14 simulacions diferents per obtenir tots els resultats.

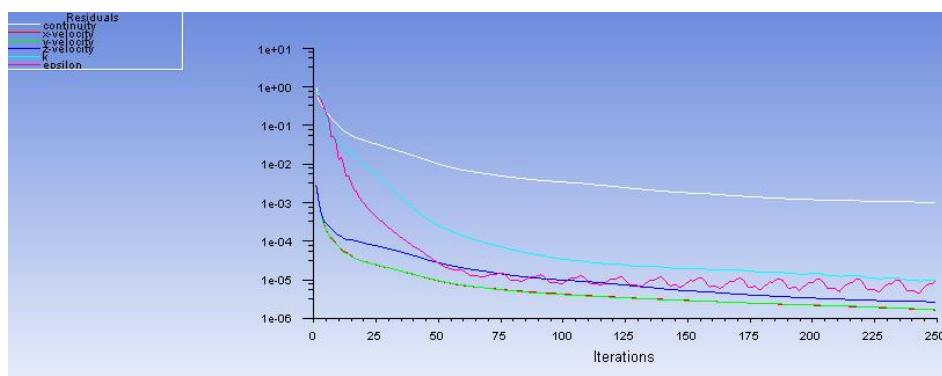


Figura 5.6 Evolució dels residus del model flotador



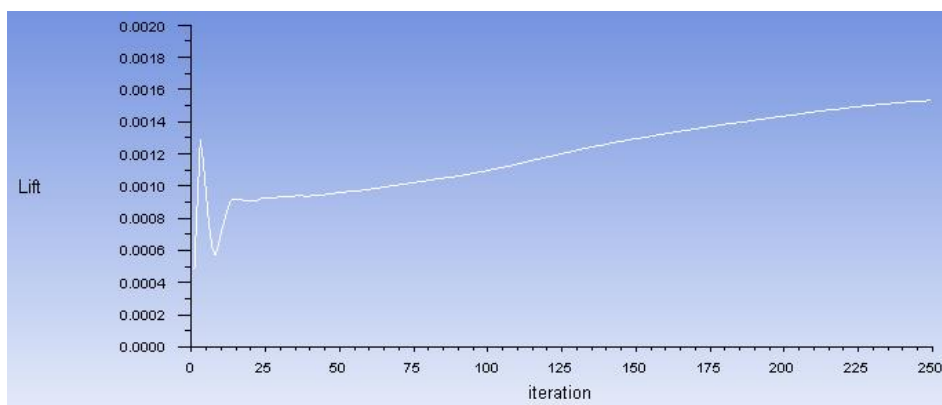


Figura 5.7 Evolució del coeficient de lift model flotador

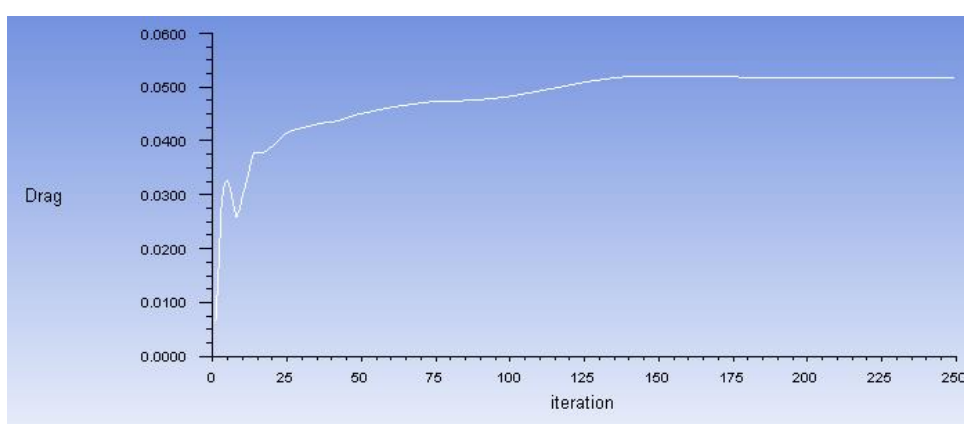


Figura 5.8 Evolució del coeficient de drag model flotador

## 5.4. Resultats obtinguts

Després de realitzar totes les simulacions es van obtenir els resultats mostrats en la taula següent:

Velocitat	$C_D$	$C_L$	Número d'iteracions
2 m/s	$5,0227 \times 10^{-2}$	$1,5296 \times 10^{-3}$	250
3 m/s	$5,0040 \times 10^{-2}$	$1,5323 \times 10^{-3}$	261
4 m/s	$5,0131 \times 10^{-2}$	$1,5259 \times 10^{-3}$	258
5 m/s	$5,1740 \times 10^{-2}$	$1,5318 \times 10^{-3}$	249
6 m/s	$5,1538 \times 10^{-2}$	$1,5343 \times 10^{-3}$	255

7 m/s	$5,1146 \times 10^{-2}$	$1,5337 \times 10^{-3}$	262
8 m/s	$5,1013 \times 10^{-2}$	$1,5269 \times 10^{-3}$	259
Valor mig	$5,0834 \times 10^{-2}$	$1,5306 \times 10^{-3}$	

*Taula 1 Resultats de  $C_D$  i  $C_L$  obtinguts a les simulacions*

Com els coeficients de drag i lift són nombres adimensionals que proporcionen informació sobre el comportament de la geometria tractada enfront un flux, es pot observar que els resultats obtinguts per a cada velocitat són molt similars. Tot i que teòricament hauria de ser iguals, les diferències que pareixen es deuen al fet que els processos iteratius no proporcionen una solució numèricament exacte, però sí una solució que s'aproxima de forma molt acurada a la realitat. Per tant, per calcular les forces que actuen sobre el flotador a cada velocitat s'utilitzarà una mitjana entre tots els valors obtinguts.

Si s'analitzen aquests dos coeficients, es pot observar que s'aproximen al que caldria esperar degut a la seva geometria. Pel que fa al coeficient de lift, s'obté un valor molt petit, de l'ordre de  $10^{-3}$ . El resultat es pot considerar correcte ja que al navegar es pot observar que el patí no s'eleva de l'aigua en augmentar la velocitat, i inclús el balanceig que fa amb l'onatge deixa entreveure que possiblement la força principal de sustentació de l'embarcació és la força d'Arquímedes. Pel que refereix al coeficient de drag, tal com ja s'havia dit, després d'un llarg procés d'estudi i comparació amb altres formes geomètriques similars, s'han obtingut valors de  $10^{-2}$ , coherents amb els que es podrien obtenir amb un cilindre carenat.

Utilitzant les fórmules que defineixen els coeficients de drag i lift es poden calcular les forces de sustentació i de resistència a l'avanç que, posteriorment, s'intentaran millorar amb el nou disseny de flotador. En aquest cas els valors es veuen modificats per les característiques de l'estudi, ja que depenen de l'àrea del cos, de la densitat del líquid del flux i de la velocitat del mateix. En la taula següent es pot observar els valors de les susdites forces per a cada velocitat:

Velocitat	$F_D$	$F_L$
2 m/s	705,382 N	21,239 N
3 m/s	1.587,110N	47,788 N
4 m/s	2.821,529 N	84,956 N

5 m/s	4.408,640 N	132,743 N
6 m/s	6.348,441 N	191,150 N
7 m/s	8.640,934 N	260,177 N
8 m/s	11.286,118 N	339,822 N

*Taula 2 Resultats de  $F_D$  i  $F_L$  obtinguts per a cada velocitat*

S'observa de forma evident que les forces de sustentació proporcionades no són suficients per aguantar el pes del conjunt, que haurien de rondar entre els 1960 i 2450 N aproximadament, sent la força d'Arquímedes la causant de mantenir l'embarcació en flotació. Per comprovar que aquest resultat és correcte, s'ha realitzat un càlcul d'aquesta força considerant el volum submergit a l'aigua segons les línies de flotació habituals en un patí a vela. S'han analitzat novament fotografies i consultat amb navegants de patí a vela per fer aquesta consideració. Un cop conegudes de forma aproximada les condicions de flotació del patí, s'ha realitzat el tall pertinent amb ajuda del SOLIDWORKS com es mostra en la figura 5.9. S'obté un volum aproximat de  $0,25 \text{ m}^3$ . Per conèixer el valor de força es va emprar la fórmula següent:

$$E = \rho \cdot g \cdot V$$

(Ec. 5.4.1)

On E: Força d'Arquímedes

$\rho$ : Densitat del fluid.

g: acceleració de la gravetat .

V: Volum submergit

En conclusió, s'observa que amb l'aproximació realitzada de volum submergit resulta una força de 2.445,1 N, un valor capaç de sustentar sense problemes els 200 o 250 kg del conjunt, és a dir, contrarestar les forces d'entre 1.960 i 2.450 N que s'havien comentat anteriorment.

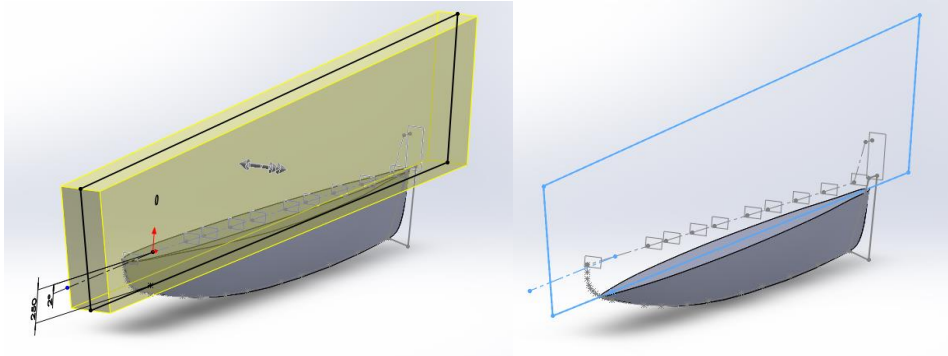


Figura 5.9 Tall realitzat al model de flotador segons el seu volum submergit aproximat

## 5.5. Anàlisis de comportament del flotador

Per veure còm es comporta el flotador del patí a vela s'ha realitzat un anàlisis de la interacció entre el cos amb el fluid.

### 5.5.1. Camp de velocitats

En la figura 5.10 es pot observar el comportament genèric del flotador sotmès al flux. De forma clara apareixen dos punts bàsics on la velocitat es veu modificada de forma molt pronunciada: a la popa i a la proa. Pel que fa a la zona longitudinal del flotador, com no hi ha una gran curvatura ni cap geometria marcada, no s'observa cap modificació destacable en la velocitat del flux, a part de la provocada per les forces viscoses que apareixen a la zona més propera del flotador. No es distingeix de forma apreciable cap punt de despreniment de capa límit en el lateral del flotador, ni tan sols existeix una acceleració positiva destacable deguda a la separació de les línies de corrent al rodejar el cos. Els valors de la llegenda de colors de les figures representen tants per un respecte la velocitat a infinit (o velocitat de flux).

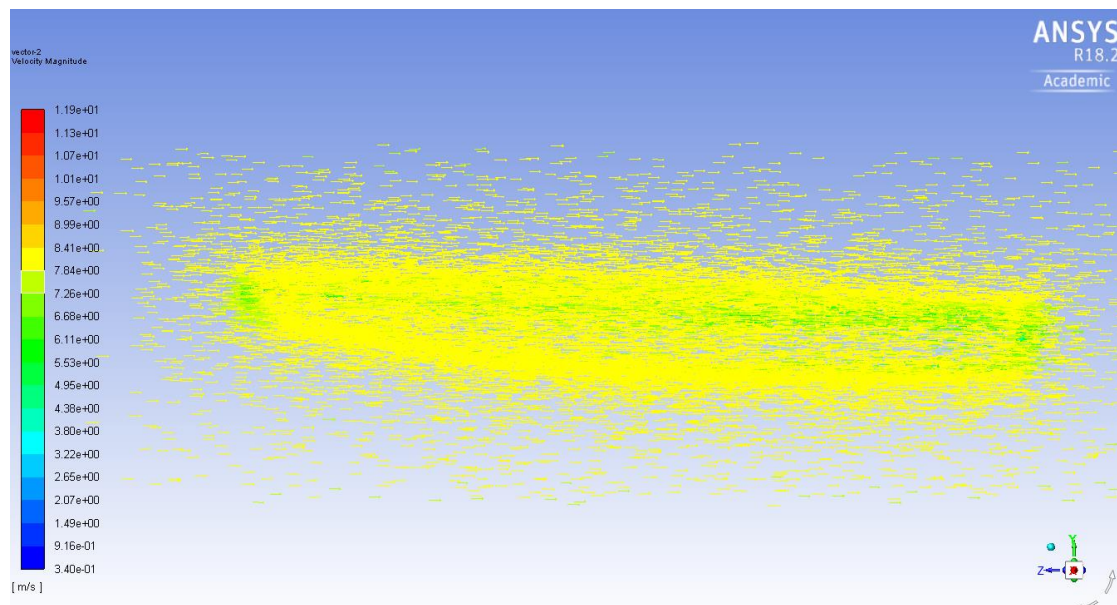
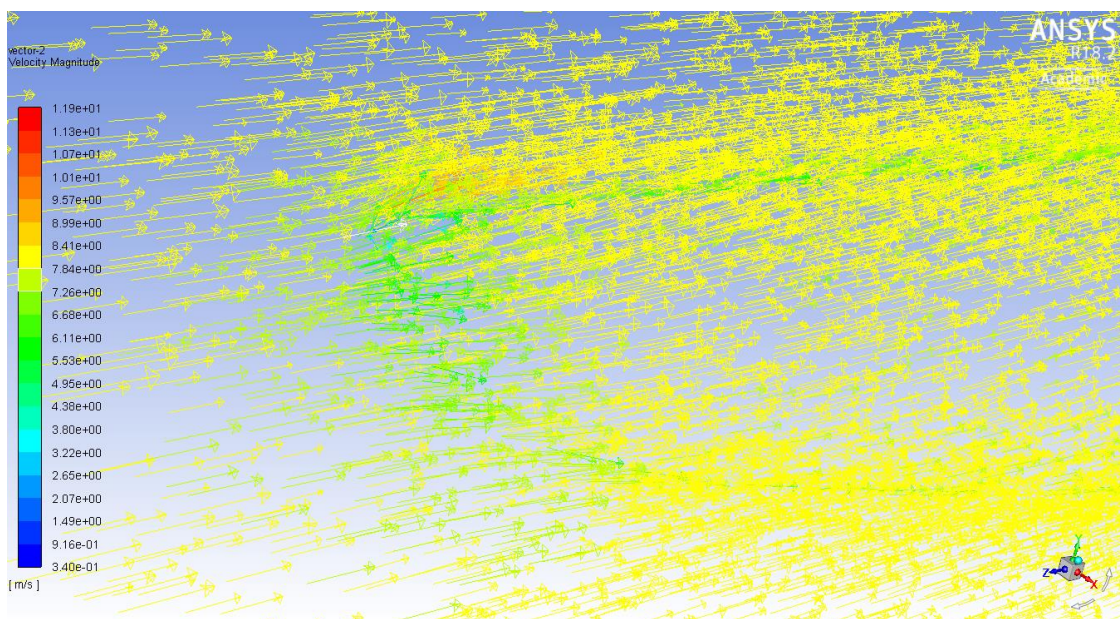


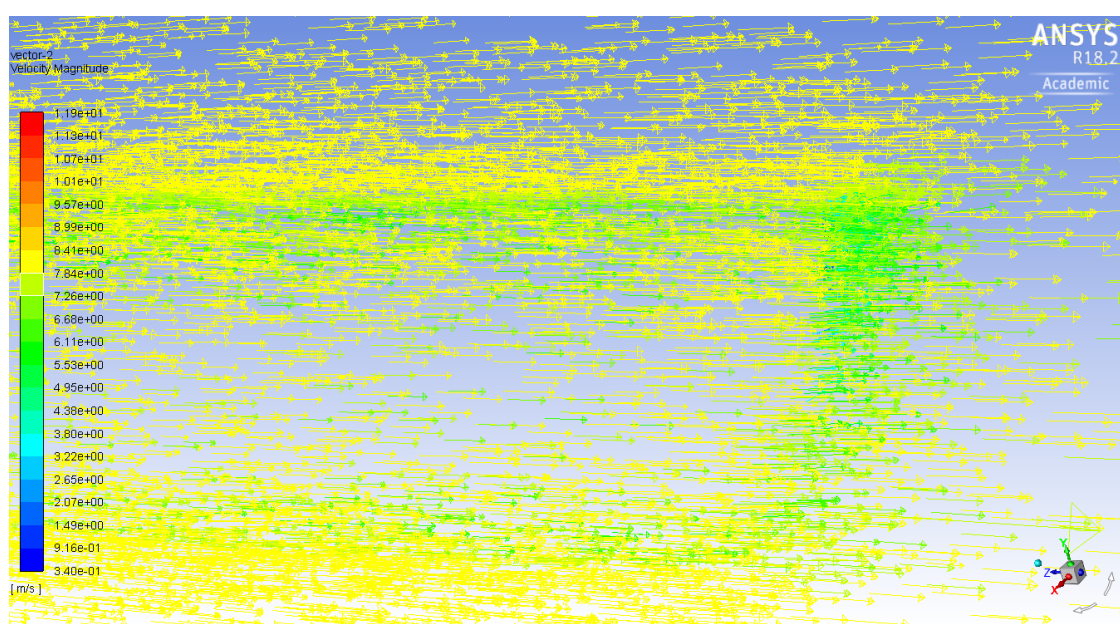
Figura 5.10 Distribució de velocitats al llarg del flotador

El punt d'estancament es situa a la proa del flotador, tal com s'observa en la figura 5.11. En aquest punt sí que es pot observar una altra singularitat per l'efecte que causa l'aresta que uneix la coberta i el flotador, on apareix una separació de la capa límit en conseqüència de l'agressiva geometria amb la qual interacciona el flux. Un altre lloc que presenta una clara modificació de la velocitat del fluid, en aquest cas una disminució, és la popa, degut a l'estela o deixant que apareix (Figura 5.12). Aquestes dues zones són les principals causants de l'aparició de la força de resistència a l'avanç del cos. Cal destacar que, al tractar-se d'un model en 3D, es dificulta molt la creació d'uns gràfics clars per estudiar el comportament del fluid, i ha sigut necessari reduir la densitat de vectors que apareixen en el model. Inclús així costa distingir el comportament de la velocitat de les partícules per la falta de visibilitat.





*Figura 5.11 Distribució de velocitats en la proa*



*Figura 5.12 Distribució de velocitats en la popa*

### 5.5.2. Línies de corrent

S'han disposat de molt poques línies de corrent amb l'objectiu de no tenir una gran densitat de línies que no permetessin entendre el resultat, podent així observar les modificacions de direcció de les partícules a causa de la geometria del cos. Tal com es preveia, les línies de corrent es separen en topar amb el flotador, rodejant-lo seguint la seva forma per acabar unint-

se novament a la popa. En la part superior es pot apreciar una turbulència deguda a l'aresta aguda que uneix el flotador i la coberta del patí, tal com es veu en l'estudi de camp de velocitats, a causa del desprendiment de la capa límit.

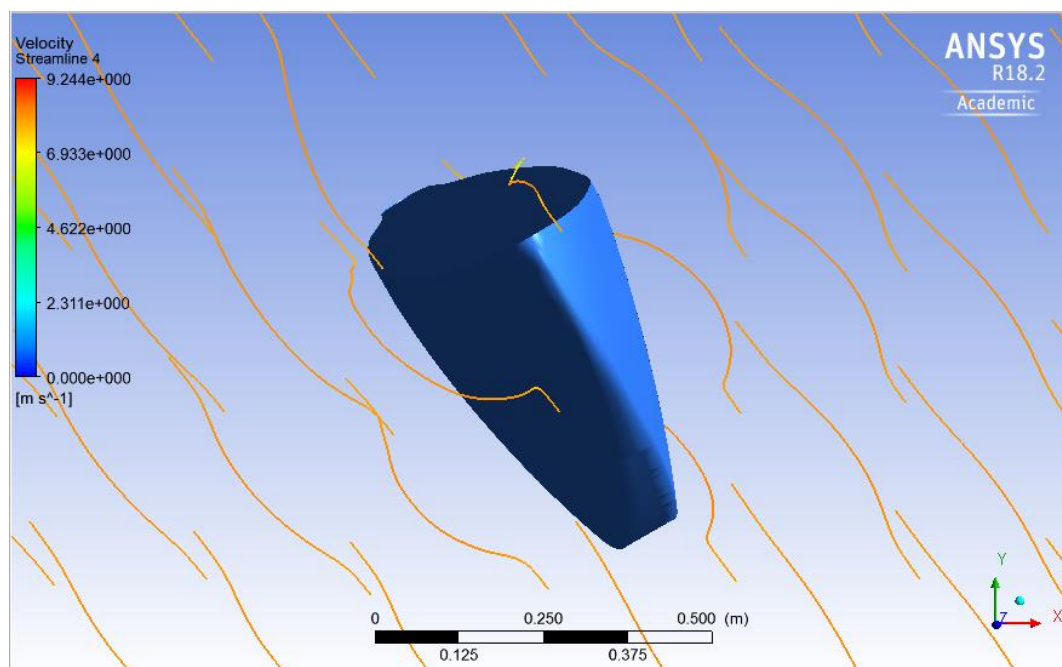


Figura 5.13 Línies de corrent rodejant el flotador

### 5.5.3. Camp de pressions

Per últim, si s'analitza el camp de pressions que apareix a causa del flux mostrat en la Figura 5.14, es veu que el punt de màxima pressió es situa en la proa, en el punt d'estancament, degut a la velocitat nul·la que transforma l'energia cinètica en pressió segons el teorema de Bernoulli (Figura 5.15). Tot i aparèixer una petita pressió en la part inferior del flotador, no és prou elevada com per proporcionar una força de sustentació prou gran al flotador. En el lateral no s'observa tampoc cap modificació destacable de les pressions, mostrant que la geometria no provoca un desprendiment de la capa límit que generi una gran estela, ni accelera el fluid de forma prou pronunciada per observar cap efecte en el seu comportament hidrodinàmic. En la popa s'observa un augment de la pressió a causa del deixant que hi apareix. Per últim, sembla que arribant a l'extrem del flotador hi ha un reenganxament de la capa límit quan comença a generar-se el deixant, ja que apareix una lleu disminució de pressió. Tot i això, de seguida torna a haver-hi un desprendiment de la capa com es mostra en la Figura 5.16. Cal destacar que, degut a treballar amb un model en tres dimensions, sol s'han pogut representar les pressions que apareixen en la superfície del flotador en canvi de les pressions del fluid. De totes maneres, es pot extrapolar el resultat obtingut per tenir una interpretació de com es comporta, ja que les pressions representades són una causa directa de les pressions que apareixen en el flux.

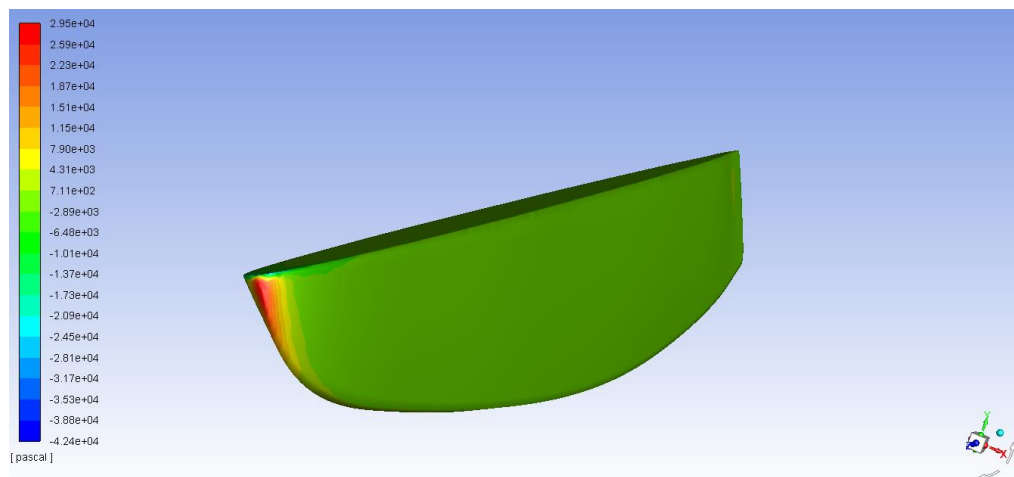


Figura 5.14 Distribució de pressions al llarg del flotador

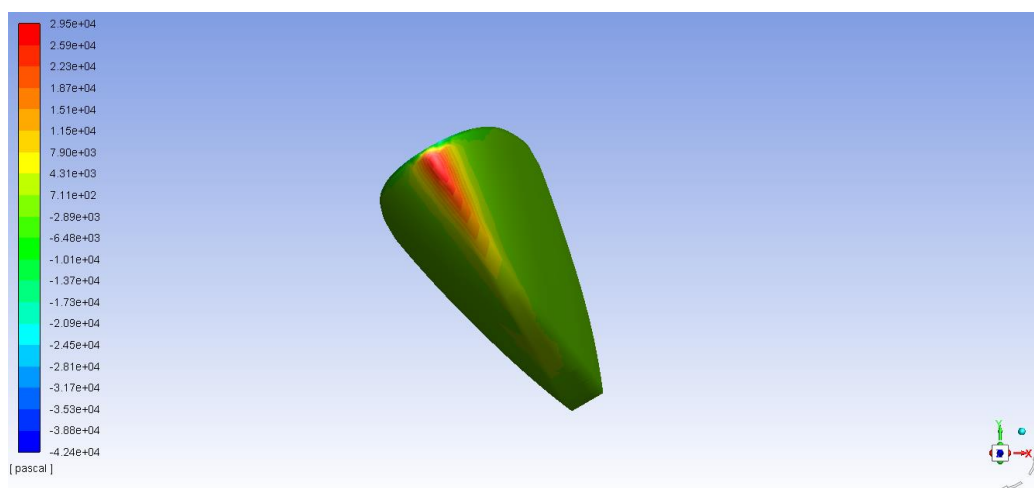


Figura 5.15 Distribució de pressions a la proa

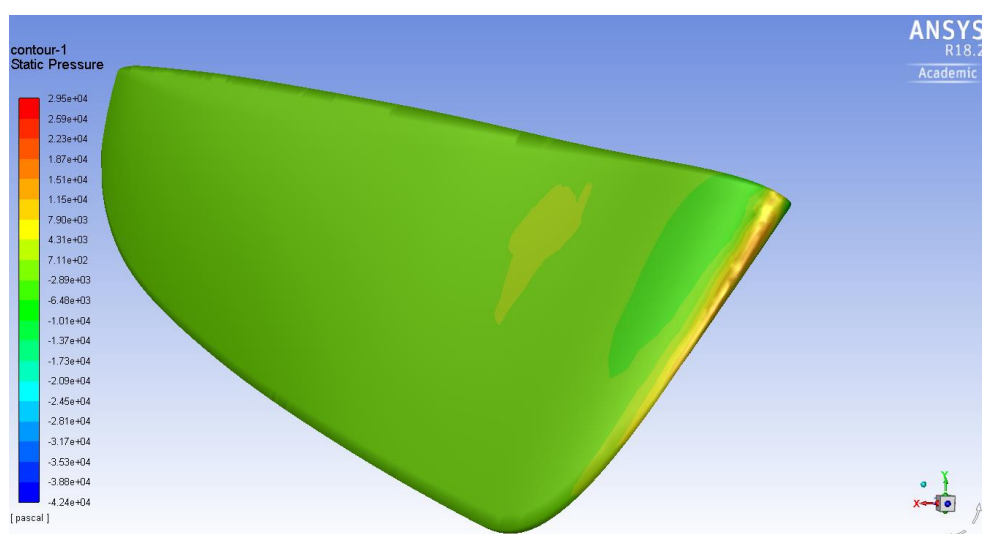


Figura 5.16 Distribució de pressions a la popa



## 6. Millora del model: modelització i estudi

Un cop s'ha estudiat el comportament del flotador utilitzat actualment en els patins a vela ja es pot començar a realitzar la millora del model. Per fer-ho es poden plantejar diferents idees, tals com modificar les línies d'aigua dels plànols estàndard de l'ADIPAV, modificar les dimensions característiques de les seccions, arrodonir les arestes vives del flotador... Però possiblement en cap dels casos les modificacions de comportament obtingudes no marcarien la diferència enfront del flotador original, ja que serien mínimes i sense gaire transcendència. És per això que s'ha decidit fer una modificació que, en els moments de comportament òptim durant la navegació, pot fer destacar de forma notòria les noves característiques hidrodinàmiques del flotador.

Tal com s'havia dit anteriorment, el millor moment per treure gran rendiment d'aquestes característiques de l'embarcació és durant els llargs, on el patí es mou a velocitats elevades entre els 5 i els 8 m/s, amb una inclinació controlable d'uns 30 graus aproximadament i amb un flux de vent que impacta sobre la vela de forma gairebé perpendicular a ella. Tenint en compte aquestes condicions de navegació, s'ha considerat incorporar un hydrofoil amb l'objectiu d'eleva completament el flotador de l'aigua, reduint així de forma notòria el coeficient de fricció, l'àrea d'interacció entre l'aigua i el cos i, en conseqüència, la força de resistència a l'avanç que frena l'embarcació.

### 6.1. Procés de selecció del perfil

A l'haver una enorme quantitat de possibles perfils d'hydrofoils cal tenir en compte uns criteris de selecció. D'aquesta manera, s'aconseguirà realitzar un disseny òptim que compleixi amb els requisits funcionals necessaris. S'han emprat els criteris següents:

- Valor del coeficient de drag en funció del coeficient de lift:  
L'objectiu és buscar un perfil amb valors del coeficient de resistència a l'avanç mínims per a rangs el més gran possible de coeficients de sustentació elevats. Si es representa en un gràfic la relació que mantenen aquests coeficients es pot observar l'amplada del susdit rang i com de constant és aquesta relació. D'aquesta manera, si es veu modificat el coeficient de sustentació es pot mantenir un coeficient de resistència a l'avanç baix i sense gaires alteracions.
- Rendiment o eficiència hidrodinàmica del perfil ( $\beta$ ) en funció de l'angle d'atac:  
El rendiment hidrodinàmic és un paràmetre que es defineix com un quocient entre el coeficient de sustentació i el de resistència a l'avanç. Com és evident, un valor elevat d'aquest proporciona una relació més favorable entre aquests dos coeficients.

$$\beta = \frac{C_L}{C_D}$$

(Ec. 6.1.1.)

El Rendiment hidrodinàmic no és un valor constant, sinó que es veu modificat en funció de l'angle d'atac del perfil, tenint un punt de màxim rendiment  $\beta_{\max}$  que és el punt òptim de funcionament del perfil. Cal comparar aquest punt per als diferents possibles perfils.

- Angle d'entrada en pèrdua:

Un dels màxims problemes que pot presentar un hydrofoil és que entri en pèrdua durant el seu funcionament, ja que perd les seves característiques de funcionament reduint de forma dràstica el coeficient de sustentació i elevant alhora el de resistència a l'avanç. Per tant, interessa tenir un valor ampli d'angles en els quals el perfil pugui treballar sense entrar en pèrdua.

Un cop s'han estipulat aquests tres criteris de selecció, s'ha realitzat una cerca amb l'objectiu de trobar un perfil adient pel problema que es presenta en aquest treball. S'ha emprat una base de dades de perfils via internet amb la pàgina [www.airfoiltools.com](http://www.airfoiltools.com), on hi ha centenars de possibles candidats. Aquesta pàgina proporciona un arxiu amb la sèrie de punts que defineix la geometria de cada perfil i que permet crear el model de simulació posteriorment dibuixant una polilínia. A més a més, ofereix uns gràfics i valors numèrics amb diferents relacions entre els coeficients que caracteritzen cada perfil, tals com el rendiment hidrodinàmic en funció de l'angle d'atac o els valors del coeficient de sustentació en funció de l'angle, entre d'altres. Així doncs, comparant directament els tres criteris de selecció entre diferents possibles candidats es pot triar una geometria d'hydrofoil per començar a crear el model definitiu que compleixi amb les especificacions de funcionament necessàries.

### 6.1.1. Possibles perfils estudiats

Entre els centenars de perfils que ofereix la base de dades s'ha reduït l'estudi a tres amb l'objectiu de limitar la durada del procés de selecció. Cal destacar que s'ha pogut prendre aquesta mesura perquè, un cop obtinguts els valors dels coeficients i forces del model de flotador real, es pot veure que qualsevol perfil que s'utilitzi millorarà de forma destacable els resultats. Un hydrofoil en unes bones condicions de funcionament oferirà un menor coeficient de resistència a l'avanç i un major coeficient de sustentació que permeti mantenir elevat el patí fora de l'aigua gairebé en la seva totalitat. També es redueix l'àrea d'interacció minimitzant de forma dràstica les forces que frenen l'embarcació. En tots els casos es fa una comparativa de les gràfiques amb un valor del nombre de Reynolds d'1.000.000, ja que s'ajusta millor a les condicions de funcionament a les que estarà sotmès l'hydrofoil per culpa de les velocitats d'ús i la dimensió que necessitarà per elevar el patí. Tot i que aquest valor s'ha obtingut posteriorment, el nombre de Reynolds dels hydrofoils durant el seu estudi té un valor de 3.992.000. Podem considerar correcte la decisió, ja que són els gràfics i valors amb major nombre de Reynolds que ofereix la base de dades.

#### I. EPPLER 66 AIRFOIL (e66-il)

El primer perfil estudiat és un e66-il. Aquest té un espessor màxim d'un 10,1% i una curvatura

màxima d'un 4,1% situada en un 52,3% de la corda. Com és habitual en els hydrofoils, la línia de curvatura mitja és positiva, i s'observa que l'intradós sobrepassa la corda del perfil. Es mostra la forma en la Figura 6.1.

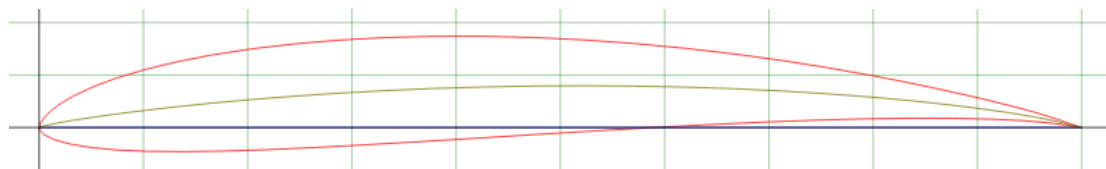


Figura 6.1 EPPLER 66 AIRFOIL (e66-il)

A continuació es mostren els gràfics proporcionats per la base de dades, on s'observa de forma visual el comportament del perfil i les diferents relacions que s'estableixen entre els coeficients que el caracteritzen segons les condicions d'ús. També proporciona els valors numèrics amb els que s'han realitzat els gràfics.

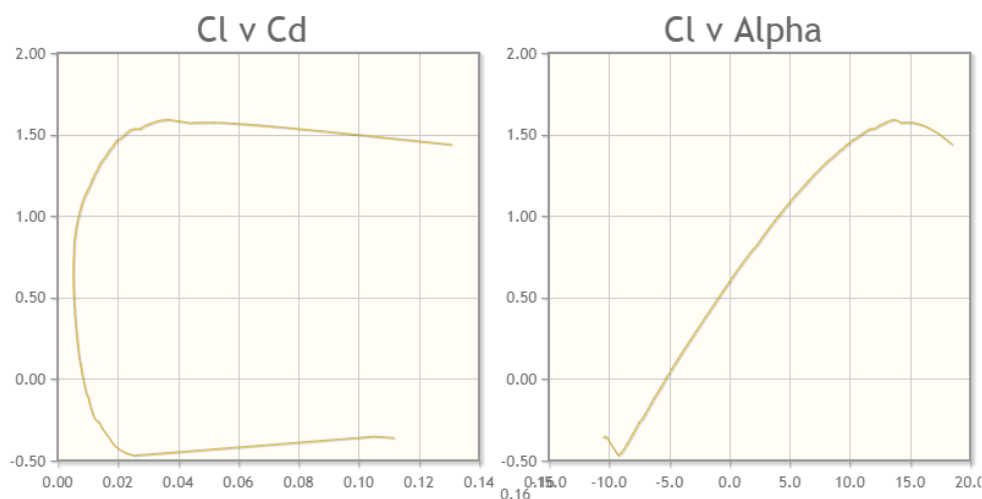


Figura 6.2 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ )

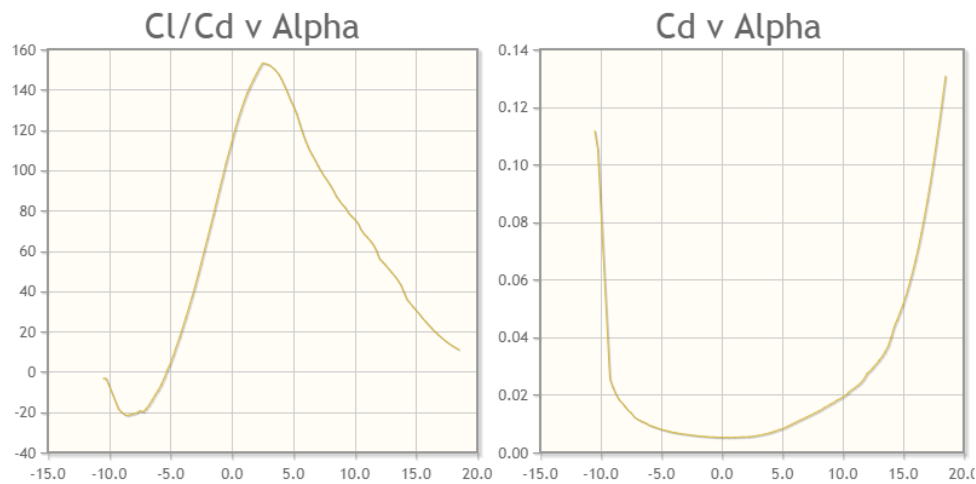


Figura 6.3 Gràfics  $\beta$  vs angle d'atac ( $\alpha$ ) i CD vs angle d'atac ( $\alpha$ )

## II. GOE 547 AIRFOIL (goe547-il)

El segon perfil estudiat és un goe547-il. Aquest té un espessor màxim d'un 10,5% i una curvatura màxima d'un 4% situada en un 49,7% de la corda. Igual que en el perfil anterior, la línia de curvatura mitja és positiva, i s'observa que l'intradós sobrepassa la corda però d'una forma molt menys pronunciada. Es mostra la forma en la Figura 6.4.

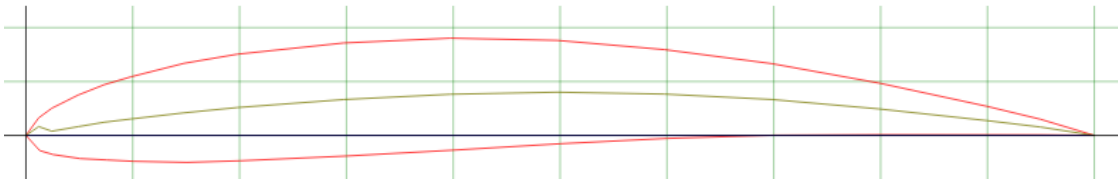


Figura 6.4 GOE 547 AIRFOIL (goe547-il)

Tot seguit es pot observar els gràfics proporcionats per la base de dades per determinar el comportament del perfil i les diferents relacions que s'estableixen entre els coeficients segons les condicions d'estudi.

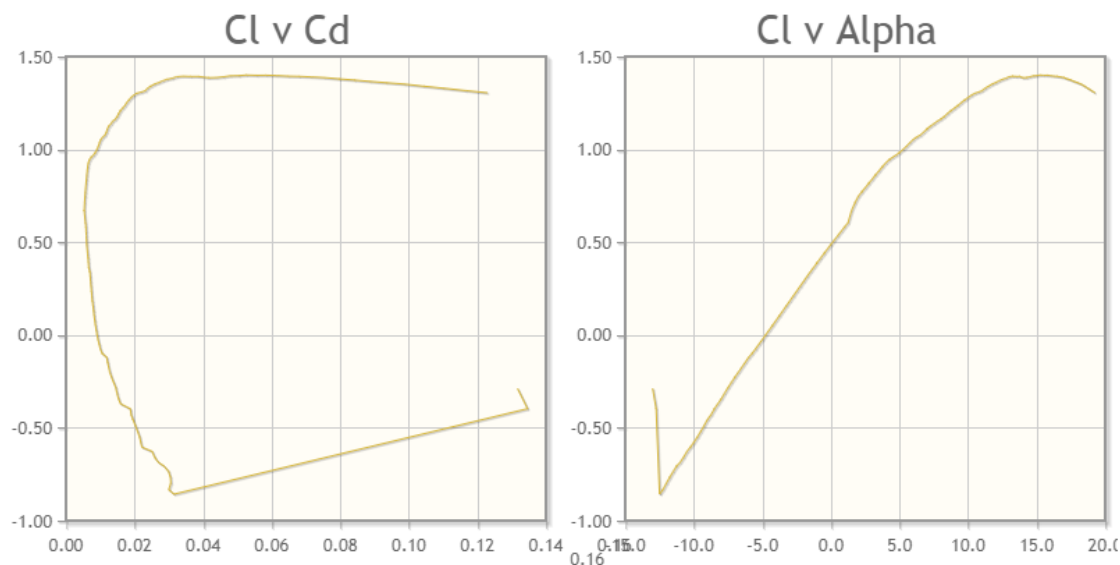


Figura 6.5 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ )

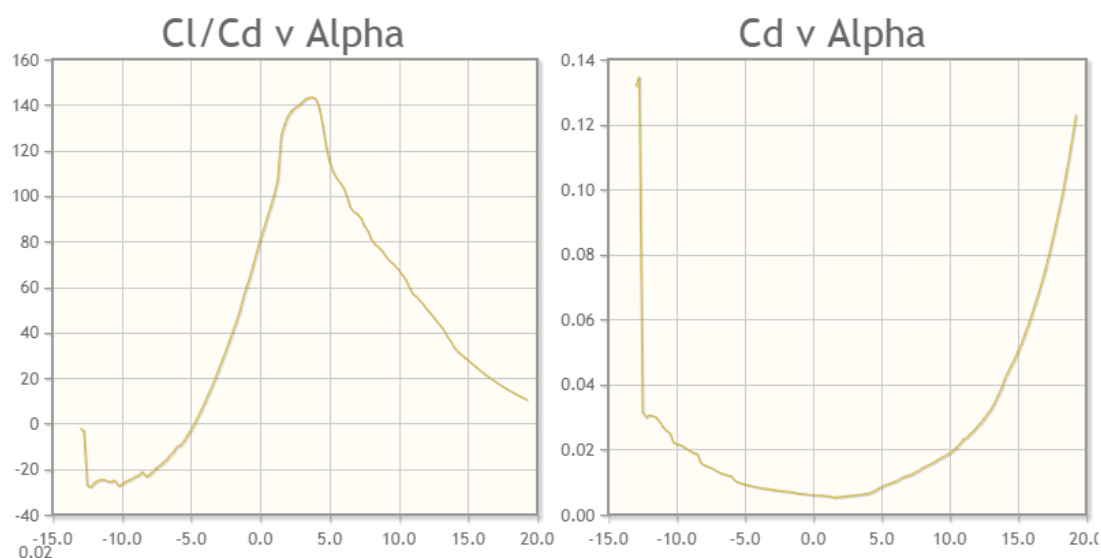


Figura 6.6 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ )

### III. FX 63-100 AIRFOIL (fx63100-il)

L'últim perfil estudiat és un fx63100-il. Té un espessor màxim d'un 9,9% i una curvatura màxima d'un 4,3% situada en un 50% de la corda. De forma similar als altres perfils, la línia de curvatura mitja és positiva i l'intradós sobrepassa la corda, però aquest cop d'una forma molt més marcada que en els casos anteriors. Cal destacar que la vora de sortida és molt més aguda. Es mostra la seva geometria en la Figura 6.7.

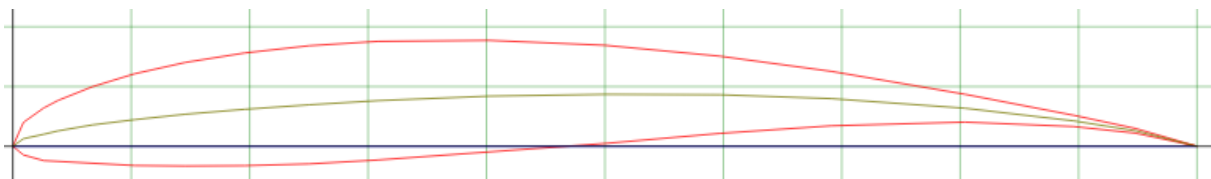
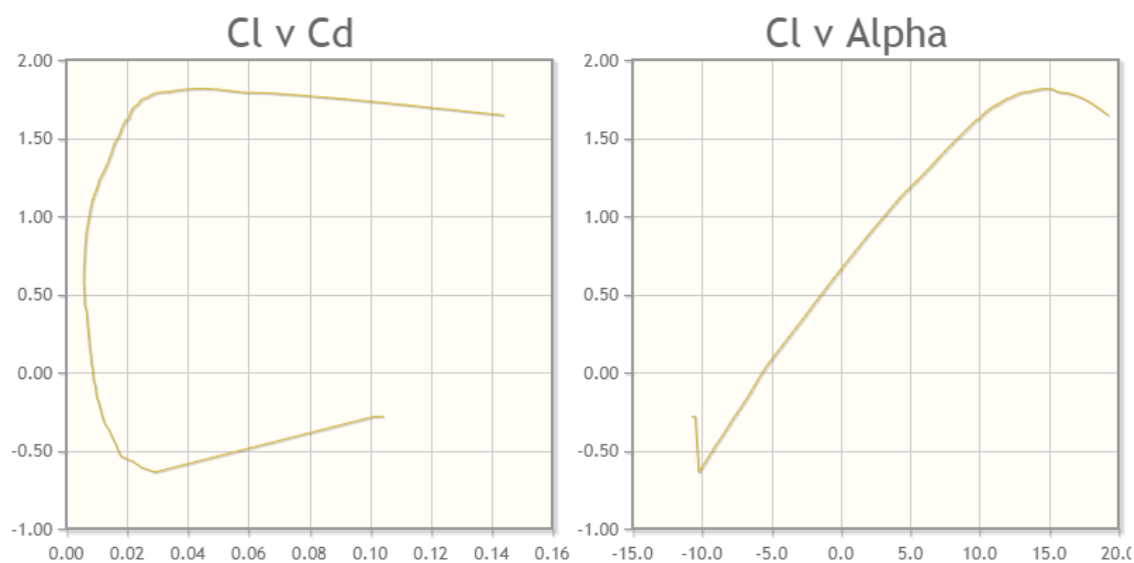
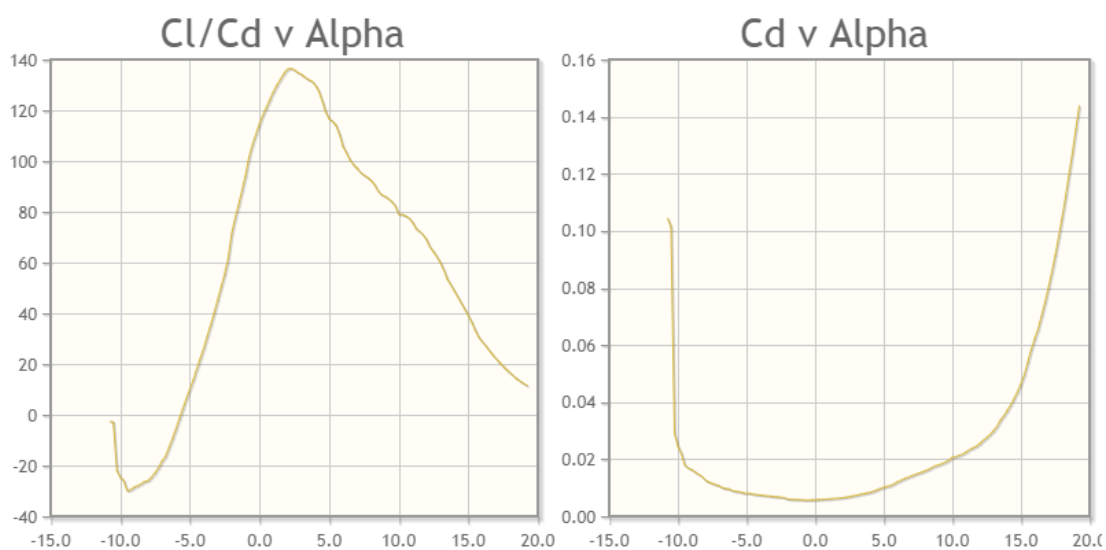


Figura 6.7 FX 63-100 AIRFOIL (fx63100-il)

A continuació es mostren els gràfics proporcionats per la base de dades on es pot observar el comportament del perfil i les diferents relacions que s'estableixen entre els coeficients segons les condicions d'estudi.

Figura 6.8 Gràfics CL vs CD i CL vs angle d'atac ( $\alpha$ )Figura 6.9 . Gràfics  $\beta$  vs angle d'atac ( $\alpha$ ) i CD vs angle d'atac ( $\alpha$ )

### 6.1.2. Selecció geometria d'hydrofoil

Per escollir d'entre les tres possibles opcions s'ha fet una comparativa entre els gràfics que mostren els paràmetres de selecció que s'han descrit anteriorment, buscant quin d'ells ofereix unes característiques més adequades per a la funció que han de desenvolupar.

Primerament, comparant el gràfic que representa el  $C_L$  en l'eix d'ordenades i el  $C_D$  en l'eix de coordenades es pot fer un estudi sobre el primer dels criteris de selecció proposats. Com l'hydrofoil interessa que treballi en condicions de sustentació, tan sols es tenen en compte els resultats en aquestes condicions ( $C_L > 0$ ), observant així com pot variar el comportament en les condicions d'ús real. Tal com s'observa en la Figura 6.10, el perfil que proporciona un major rang d'ús en condició de sustentació és el fx63100-il, seguit del e66-il i per últim el goe547-il. A més a més, i seguint el mateix ordre, es manté un valor més constant del  $C_D$  per a modificacions del  $C_L$ , fent sigui més estable durant l'ús.

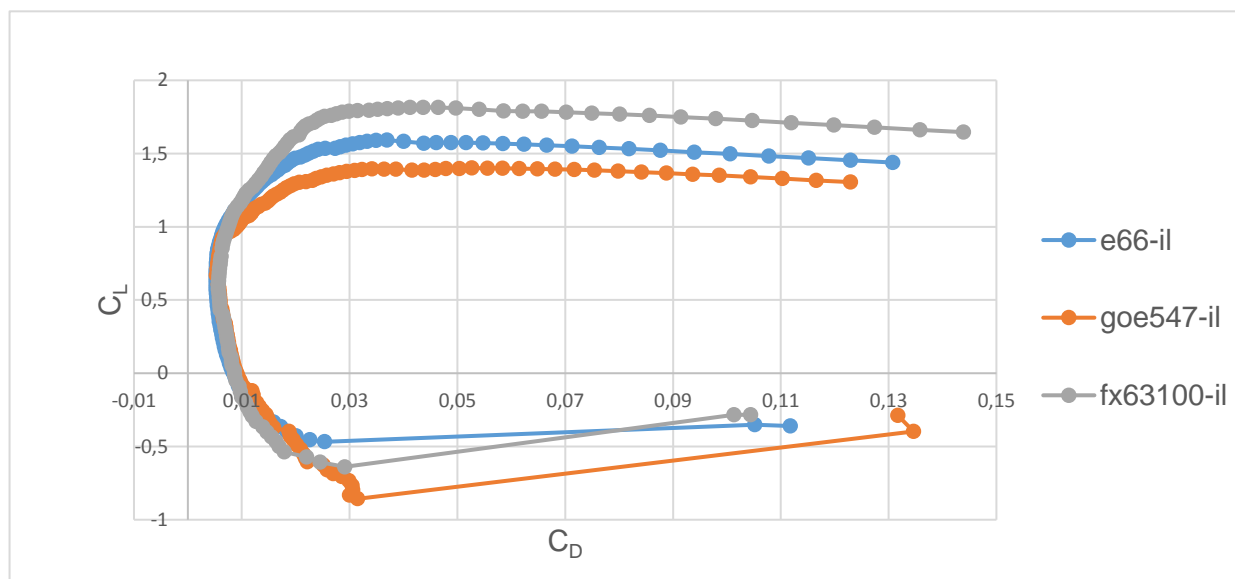


Figura 6.10 Comparativa de  $C_L$  vs  $C_D$  de cada perfil

A continuació, si es realitza un estudi del rendiment hidrodinàmic de cada model geomètric dependent del seu angle d'atac, es pot observar que tenen comportaments molt similars tots tres perfils. Tenint en compte que l'hydrofoil es dissenyarà per treballar en el seu punt de màxima eficiència, sense necessitat d'un gràfic representatiu es pot observar que hi ha un perfil que destaca sobre els altres:

- El e66-il té un rendiment màxim de 153,17 quan l'angle d'atac del flux és de 2,5°.
- El goe547-il té un rendiment màxim de 143,42 per un angle de 3,75°.
- El fx63100-il té un rendiment màxim de 136,5 per un angle de 2,25°.

Així doncs, el e66-il mostra una clara superioritat enfront dels altres dos perfils amb les

condicions d'angle d'atac adients. En particular, té un rendiment major d'un 6,80% respecte al goe547-il i d'un 12,21% respecte al fx63100-il. Cal tenir en compte que aquesta característica és la més important a l'hora de dissenyar un hydrofoil, ja que un rendiment major suposarà unes millors condicions de resistència a l'avanç per una sustentació màxima. Com en aquest treball s'està creant aquest dispositiu des de zero, es pot triar les condicions d'angle d'atac per a garantir el major rendiment possible, fent que el perfil e66-il s'adapti millor a les necessitats del model.

Per últim, es vol observar els angles on cada perfil entra en pèrdua. Per fer-ho tan sols cal observar en els gràfics que mostren el coeficient de sustentació i de resistència a l'avanç respecte a l'angle d'atac el punt on apareix un canvi brusc en la tendència, fent que caigui de forma dràstica el  $C_L$  després d'arribar a un punt màxim de sustentació i augmenti de forma pronunciada el  $C_D$ . Igual que en el primer criteri estudiat, tan sols cal tenir en compte els angles positius d'ús. Tanmateix, en els tres perfils es pot observar que l'angle d'entrada en pèrdua es pot aproximar als 15 graus, amb diferències poc notòries entre ells. Tenint en compte que per les dimensions del patí a vela és gairebé impossible posar el flotador a 15 graus d'inclinació respecte a la línia de través, es pot concloure que les diferències no són crítiques pel comportament de l'hydrofoil dissenyat, fent que aquest paràmetre sigui irrellevant per a la presa de decisió de la geometria.

Després d'haver realitzat aquests tres estudis comparatius, es pot començar descartant el perfil goe547-il a causa de la clara desavantatge que presenta enfront dels altres dos perfils, reduint a dos el nombre de candidats. Si es valora la importància dels factors realment rellevants en el model i les condicions de funcionament dels hydrofoils es pot concloure que el perfil més adequat és el e66-il, ja que forçant el seu angle d'atac a  $2,5^\circ$  s'obté un rendiment hidrodinàmic notablement superior. El motiu pel qual es pot simplificar a seleccionar el model segons una única característica es deu al fet que, tot i modificar-se de forma més notòria el coeficient de drag en alterar el coeficient de lift en la geometria triada, el comportament és molt similar en els dos casos. Tenint en compte que el perfil triat treballarà en condicions de màxima eficiència, es sap que el valor aproximat del CI és de 0,85 per el e66-il i de 0,9 pel fx63100-il, fent més evident la semblança de comportament en les proximitats d'aquesta regió, mostrades en la Figura 6.10.

## 6.2. Procés de disseny d'hydrofoil a partir d'un e66-il

Tot i haver seleccionat un perfil amb el qual crear l'hydrofoil, desenvolupar el dispositiu final no és un procés, ja que cal tenir en compte factors que modifiquen els coeficients teòrics dels coeficients de sustentació i resistència a l'avanç, tals com la resistència a l'avanç induïda als laterals o l'efecte que provoca la tija que l'uneix amb el flotador. Per tant, s'ha de realitzar un procés iteratiu modificant les dimensions fins a obtenir un valor de força de sustentació



suficient per mantenir el flotador completament fora de l'aigua. Prèviament a iniciar el procés s'han realitzat una sèrie de proves fent diversos dissenys preliminars amb l'objectiu de veure els resultats aproximats de coeficients que es poden obtenir. Alguns exemples a destacar són un hydrofoil sense tija d'unió o diversos hydrofoils amb diferents dimensions de corda i envergadura. D'aquesta manera s'han pogut prendre una sèrie de decisions inicials per tal de simplificar les modificacions a realitzar a un únic paràmetre:

- 2 hydrofoils: amb l'objectiu de millorar l'estabilitat de l'embarcació i de distribuir les forces que interaccionen en el conjunt s'ha decidit que s'usaran dos hydrofoils, un a la zona de la proa i l'altre a la popa. Un altre motiu és que, a diferència d'altres dispositius d'esport aquàtic que utilitzen hydrofoils, les dimensions del patí a vela impossibiliten el control de la distribució de pesos quan l'embarcació sobresurt de l'aigua. Així doncs, l'única manera d'aconseguir que es mantinguin les condicions desitjades de funcionament és col·locant diversos punts de sustentació al llarg del flotador.
- Angle d'atac del perfil: tal com ja s'havia dit en l'apartat sobre el procés de selecció del perfil, s'escull que l'angle d'atac sigui el de major rendiment hidrodinàmic: 2,5 graus en el cas del e66-il. S'assegura que es treballi en les condicions òptimes de funcionament.
- Angle respecta la línia de crugia durant la simulació: com l'hydrofoil es troba inclinat 30 graus respecta la línia de crugia igual que en el cas de la simulació del flotador, cal esperar que es realitzi la simulació amb ANSYS de la mateixa manera. Tot i això, s'ha pogut comprovar que si s'inclina el dispositiu estudiat s'obtenen resultats molt diferents dels que caldria esperar, amb valors dels coeficients extremadament petits (de l'ordre  $e 10^{-5}$ ). En canvi, si es realitza la simulació amb el perfil recte s'obtenen resultats molt similars als que caldria esperar segons les dades proporcionades per la base d'on s'ha extret el model geomètric. En conclusió, un cop s'han obtingut els resultats del model recte s'han extrapolat fent la projecció de la força de sustentació a 30 graus.
- Dimensió de la corda: s'ha decidit que la corda de l'hydrofoil farà 0,5 metres. Aquesta decisió s'ha pres simplement per marcar un límit dimensional que defineixi completament la geometria del perfil, ja que totes les altres dimensions depenen de la corda. Així doncs, tan sols cal variar l'envergadura de l'hydrofoil fins obtenir els resultats de coeficients i forces necessaris per sustentar l'embarcació.
- Tija: Per tal d'unir l'hydrofoil amb el flotador s'ha considerat una tija amb les dimensions mostrades en la Figura 6.11 (en mil·límetres). D'aquesta manera es pot tenir en compte com influeix la unió en les característiques hidrodinàmiques del dispositiu. S'ha creat un perfil amb una geometria aerodinàmica per tal d'influir el mínim possible en les forces de resistència a l'avanç.

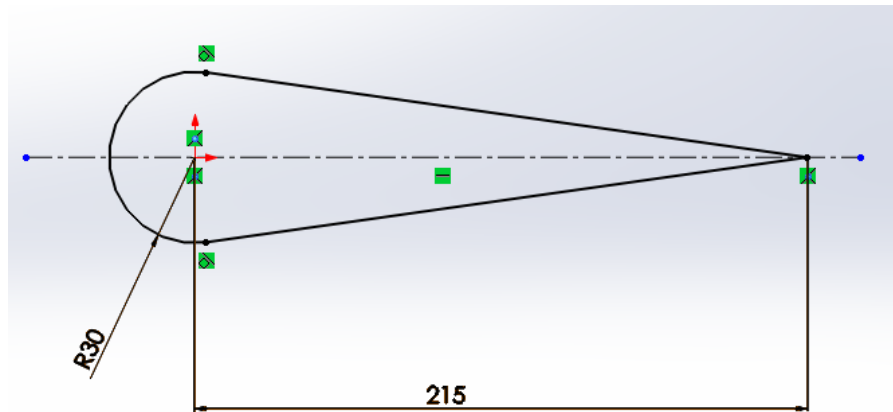


Figura 6.11 Secció de la tija

S'ha situat el centre de la circumferència de la tija a 215 mil·límetres respecte a la vora d'atac del perfil. Per fer la simulació es considera una part proporcional de 200 mil·límetres d'alçada des de la vora de sortida de l'hydrofoil.

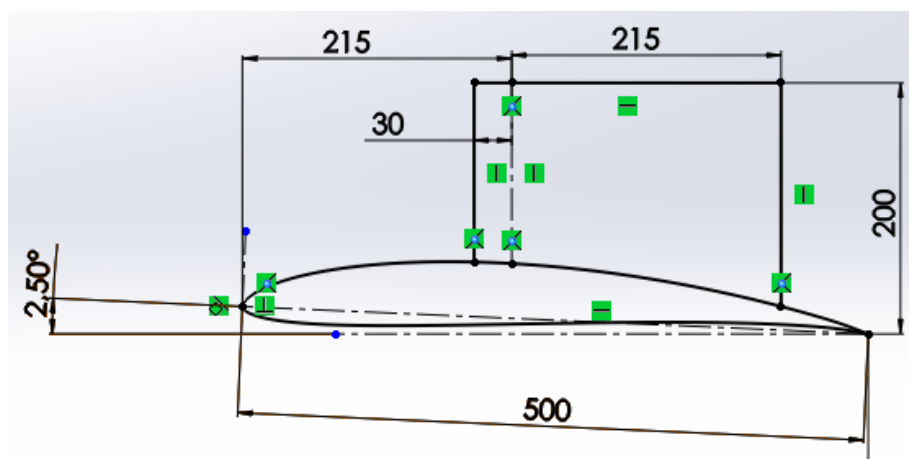


Figura 6.12 Alçat del dispositiu hydrofoil + tija

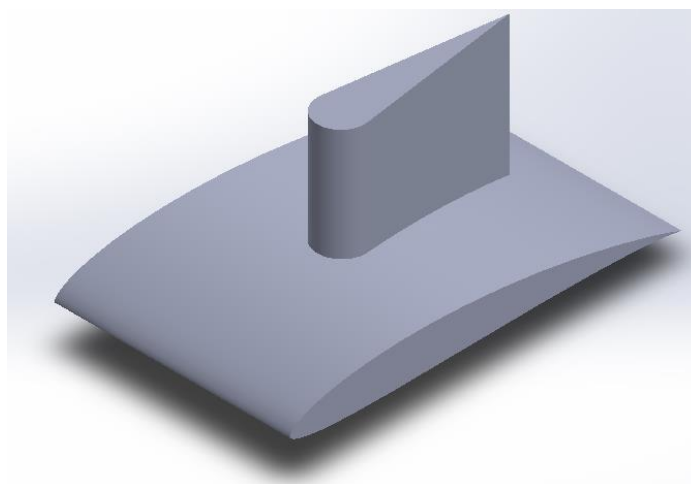
Un cop s'han estipulat aquestes característiques conjunes, es pot iniciar el procés iteratiu fins obtenir els resultats desitjats: Una força de sustentació capaç d'eleva el conjunt d'entre 200 i 250 kg. Per fer-ho, la projecció sobre l'angle de 30 graus de cadascun dels hydrofoils ha de tenir un valor entre 980 i 1.225 N en les condicions desitjades de velocitat. Per comparar el funcionament amb l'embarcació inicial, es compara el valor de les forces amb les obtingudes pel flotador inicial a la seva velocitat màxima de 8 m/s.

Partint d'aquesta premissa, s'ha començat el procés iteratiu modificant l'envergadura del dispositiu. El procediment de càlcul amb ANSYS de cadascun dels models estudiats és igual a l'explicat per a la simulació amb el flotador però sense inclinar el model. Es va partir d'un valor de 500 mm, obtenint unes forces de sustentació molt elevades d'uns 8.000 N per a cada

hydrofoil. Seguidament es va decidir reduir a la meitat aquest valor geomètric i les forces obtingudes tenen un valor aproximat de 700 N, aproximant-se molt més al resultat esperat. Per últim es va fixar l'envergadura en 300 mm, proporcionant un model que compleix amb les característiques requerides.

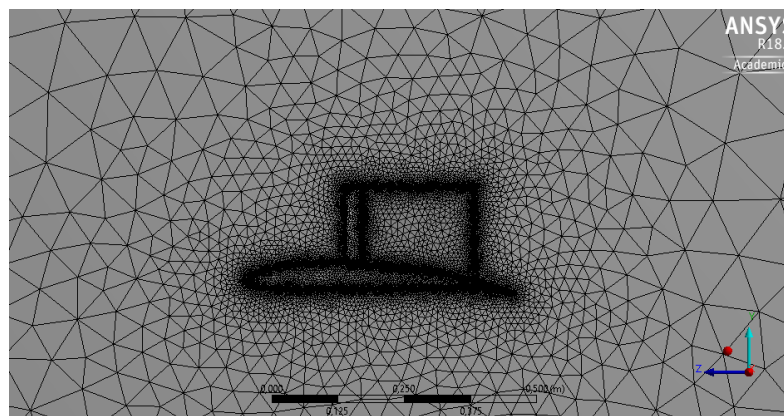
### 6.3. Model d'hydrofoil definitiu: estudi

El model definitiu creat amb el SOLIDWORKS es mostra en la Figura 6.13.



*Figura 6.13 Geometria final de l'hydrofoil*

S'ha importat la geometria al "desing modeler" d'ANSYS i s'ha seguit el mateix procediment que al definir el model del flotador: s'ha limitat la zona de simulació amb una capça rectangular, s'ha retallat el sòlid amb una operació booleana i s'han definit les superfícies "inlet", "outlet", "border" i "hydrofoil" (que equival a l'anteriorment anomenada flotador) amb l'eina "named selection". Tot seguit, s'ha procedit a discretitzar el model amb una creació de mallat per poder resoldre el problema amb la major precisió possible. Amb ajuda d'un "mesh sizing" realitzat en les arestes que delimiten la forma de l'hydrofoil s'ha anat creant de forma progressiva una malla el més fina possible fins a arribar gairebé a la limitació d'elements de la versió d'estudiant d'ANSYS. S'ha aconseguit una malla composta per 88.006 nodes i 493.157 elements. Igual que en el cas del flotador del patí a vela, s'ha emprat una malla de forma triangular, ja que s'adapta millor a la forma complexa de les superfícies que defineixen la geometria del model. En la Figura 6.14 es pot observar una secció de la zona d'estudi i el mallat definit.



*Figura 6.14 Secció del mallat*

A continuació s'ha definit el tipus de problema a tractar amb Fluent i s'han estipulat els mateixos paràmetres que amb el flotador per a realitzar la simulació. Cal destacar que s'ha decidit fixar la velocitat d'entrada de l'inlet en 8 m/s, que és la velocitat màxima capaç d'assolir l'embarcació inicial. L'única diferència destacable en la resolució de l'hydrofoil ha sigut els valors de referència definits per obtenir el valor numèric dels coeficients de drag i lift:

- Per trobar el  $C_L$ : per obtenir aquest valor s'ha considerat la seva longitud característica com la corda del perfil, de 0,5 metres de llargada, i l'àrea de referència com l'àrea projectada per la corda i l'envergadura, amb un valor de  $0,15 \text{ m}^2$ . En el cas dels perfils alats s'utilitza aquesta superfície per realitzar els càlculs de força de sustentació, motiu pel qual es comença a iterar amb aquests valors de referència.
- Per trobar el  $C_D$ : per obtenir aquest valor s'ha considerat la seva longitud característica com la corda del perfil, de 0,5 metres de llargada, i l'àrea de referència com l'àrea projectada de la seva envergadura per l'espessor màxim del perfil (que és un 10,1% de la corda), obtenint un valor de  $1,515 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ . Aquesta decisió es deu al fet que aquesta àrea és on actua en major proporció les forces de resistència a l'avanç en l'hydrofoil. Amb la referència usada per trobar el coeficient de sustentació s'han obtingut valors extremadament petits, de l'ordre de  $10^{-6}$ , a diferència dels obtinguts amb l'explicada anteriorment, on els valors s'adeqüen a la realitat sent de l'ordre de  $10^{-2}$ . Cal destacar que aquest coeficient es veu modificat sobre el teòric proporcionat per la base de dades a causa de l'aparició de la tija i de les forces de resistència a l'avanç induïdes que hi apareixen.

Per últim s'han especificat els monitors de càlcul necessaris per obtenir els resultats d'interès durant la simulació, definint els coeficients de drag i de lift referents a la superfície "hydrofoil". A continuació s'ha realitzat una inicialització de tipus híbrida, finalitzant el pre-procés del problema.

Igual que amb el flotador original, s'han definit un límit de 1.000 iteracions i s'ha estipulat un valor de  $10^{-3}$  en els diferents residus de càlcul de cada iteració per a considerar que la solució ha convergit. Seguidament s'ha procedit a realitzar el càlcul de la simulació, obtenint la solució final a les 123 iteracions. Es pot observar l'evolució dels residus en la Figura 6.15 i la dels

coeficients en les Figures 6.16 i 6.17.

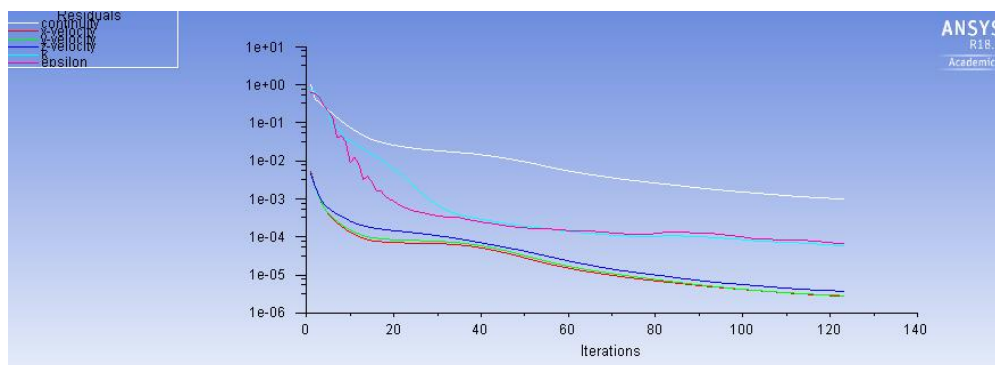


Figura 6.15 Evolució dels residus de l'hydrofoil

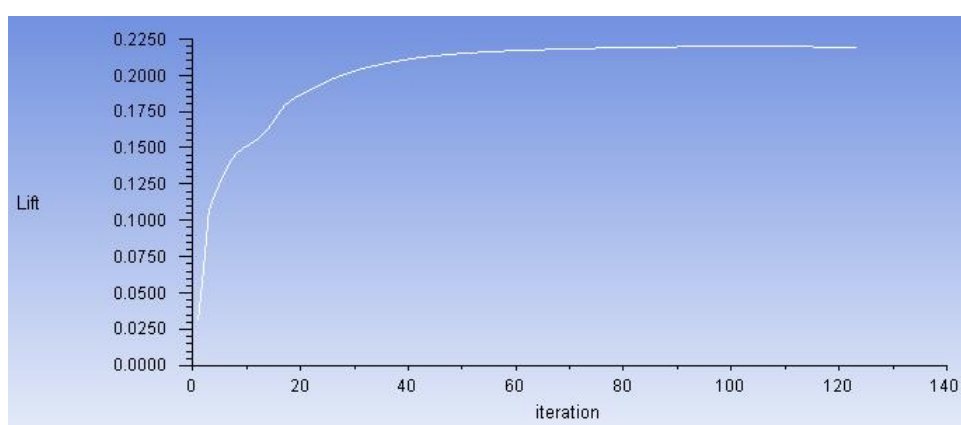


Figura 6.16 Evolució del coeficient de lift de l'hydrofoil

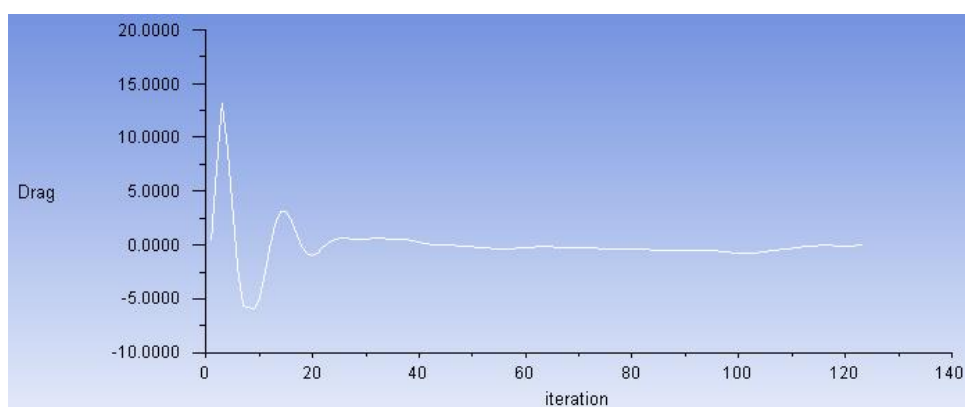


Figura 6.17 Evolució del coeficient de drag de l'hydrofoil

## 6.4. Model d'hydrofoil definitiu: resultats obtinguts

La simulació del dispositiu d'hydrofoil dissenyat proporciona els següents valors del coeficients de drag i lift. Es comparen amb els valors teòrics proporcionats per la base de dades per observar la modificació que pateixen a causa de la tija i de l'efecte de resistència a l'avanç induïda:

	$C_D$	$C_L$
<i>Valor teòric (base de dades)</i>	$5,52 \times 10^{-3}$	$8,455 \times 10^{-1}$
<i>Valor obtingut</i>	$1,0915 \times 10^{-2}$	$2,1930 \times 10^{-1}$

*Taula 3 Comparativa de valors de coeficients teòrics envers els obtinguts per simulació amb Fluent*

Tal com era d'esperar, els dos coeficients es veuen altament modificats per l'efecte dels dos factors anteriorment esmentats: Es redueix el valor del lift i augmenta de forma considerable el de drag. La modificació de les línies de corrent esperades si tan sols existís el perfil (model 2D) altera les zones de sobrepressió i depressió de l'hydrofoil (model 3D). A més a més, la pròpia tija crea una resistència a l'avanç encara que s'hagi dissenyat amb l'objectiu d'interferir el mínim possible en el funcionament del dispositiu, fent-la aerodinàmica. Usant les fórmules que defineixen els coeficients, i emprant l'àrea projectada de l'hydrofoil per realitzar els càlculs, es poden obtenir les forces que regeixen el model fluid estudiat a 8 m/s:

$F_L$ 1 hydrofoil	$F_L$ 1 hydrofoil projectada	$F_L$ total	$F_L$ a superar
1.050,53 N	909,79 N	1.819,58 N	1.960 N

*Taula 4 Forces de sustentació que regeixen el sistema*

$F_D$ 1 hydrofoil	$F_D$ total	$F_D$ flotador original
52,2872 N	104,5744 N	11.286,118 N

*Taula 5 Forces de resistència a l'avanç que regeixen el sistema*

Es pot observar que, per a la velocitat màxima del model inicial, la força de sustentació és lleugerament inferior a la mínima que s'ha estipulat en aquest treball per elevar el pes del conjunt, i més tenint en compte que hi haurà un lleuger augment de pes a causa del propi hydrofoil. Malgrat tot, observant la destacable reducció que ha sofert la força de resistència a l'avanç i tenint en compte que l'objectiu del dispositiu és treballar a velocitats més elevades, es pot considerar que el resultat és suficientment bo. Cal, però, trobar la limitació de velocitat que permet usar l'hydrofoil. Per fer-ho, tan sols cal trobar el valor en el qual la força de sustentació arriba al límit estipulat de 2.450 N (250 kg):

$F_L$ límit	$F_L$ 1 hydrofoil 30 graus	$F_L$ 1 hydrofoil sense projectar	Velocitat límit
2.450 N	1.225 N	1.414,51 N	9,2830 m/s

*Taula 6 Obtenció de la limitació de velocitat del nou model de flotador*

D'aquesta manera es pot determinar que, per velocitats inferiors a aquest valor, l'hydrofoil es comportarà de forma estable mantenint la línia de flotació entre ell mateix i el flotador. Cal destacar que, com ja s'ha dit amb anterioritat, no s'ha tingut en compte l'augment de pes en afegir aquest dispositiu, deixant un petit marge de seguretat sobre es valors calculats.

## 6.5. Anàlisis de comportament

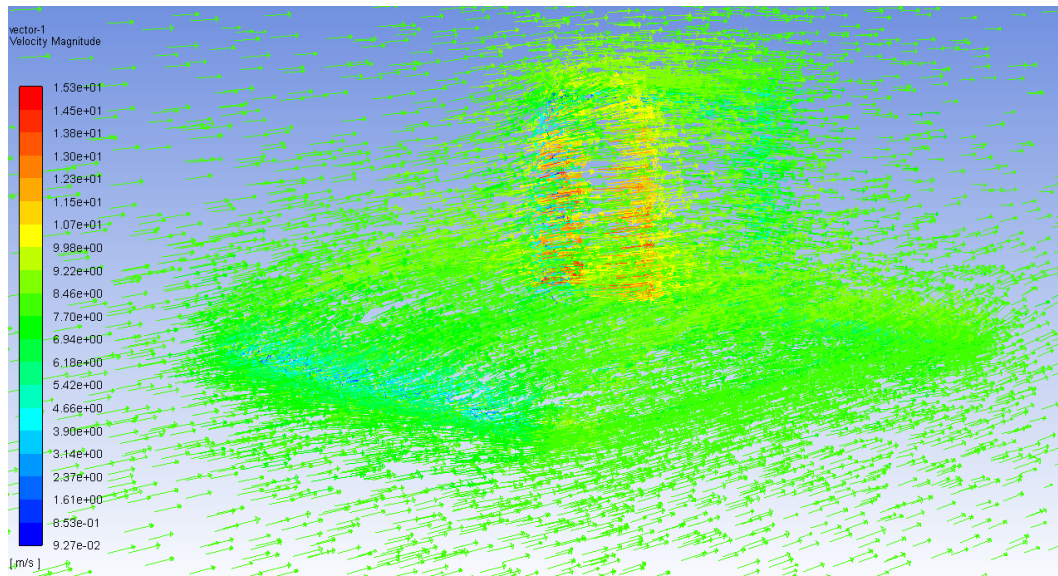
Igual que en el cas del flotador del patí a vela, es duu a terme un estudi del comportament del flux que interacciona amb l'hydrofoil per entendre el seu funcionament i comprovar els resultats obtinguts.

### 6.5.1. Camp de velocitats

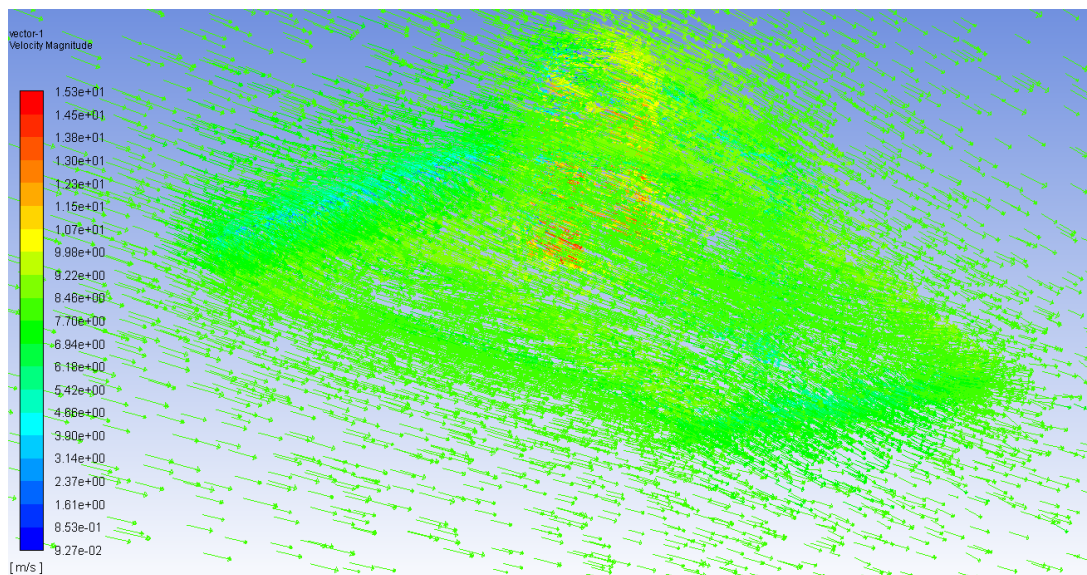
En les Figures 6.18 i 6.19 es mostra el camp de velocitats en el conjunt format per l'hydrofoil i la tija. A simple vista es pot observar que existeixen dos punts d'estancament: el caire d'atac del perfil i la zona frontal de la tija. Cal destacar que la tija afecta de forma destacable en els resultats obtinguts a causa de la seva geometria menys hidrodinàmica que la del perfil e66-il, obtenint al seu voltant la velocitat màxima del fluid. Tot i això, no es modifica el disseny d'aquesta degut a que no es realitza un estudi de tensions sobre l'estructura del patí, fent que no es pugui saber si les dimensions triades per la tija són correctes. A part, les forces de resistència a l'avanç obtingudes són molt inferiors a les inicials, pel qual es considera que la modificació de la tija no suposaria un empitjorament ni una millora notòria en els resultats.



Si s'analitza el flux a través del perfil de l'hydrofoil, que és el que proporciona les capacitats de sustentació al dispositiu, es pot distingir una acceleració positiva de les partícules a l'extradós. No s'observa de forma totalment clara en aquest gràfic, però en el camp de pressions es mostra aquest efecte de forma més representativa.



*Figura 6.18 Camp de velocitats de l'hydrofoil part superior*



*Figura 6.19 Camp de velocitats de l'hydrofoil part inferior*

Amb l'objectiu d'estudiar l'efecte causat per la tija, es mostra en la Figura 6.20 el flux des de la part superior. Apareix una gran acceleració de les partícules, que arriben a velocitats màximes de 12,14 m/s. Es recorda que la llegenda de colors mostra el valor de velocitat en tant per un respecte la velocitat del flux a infinit.



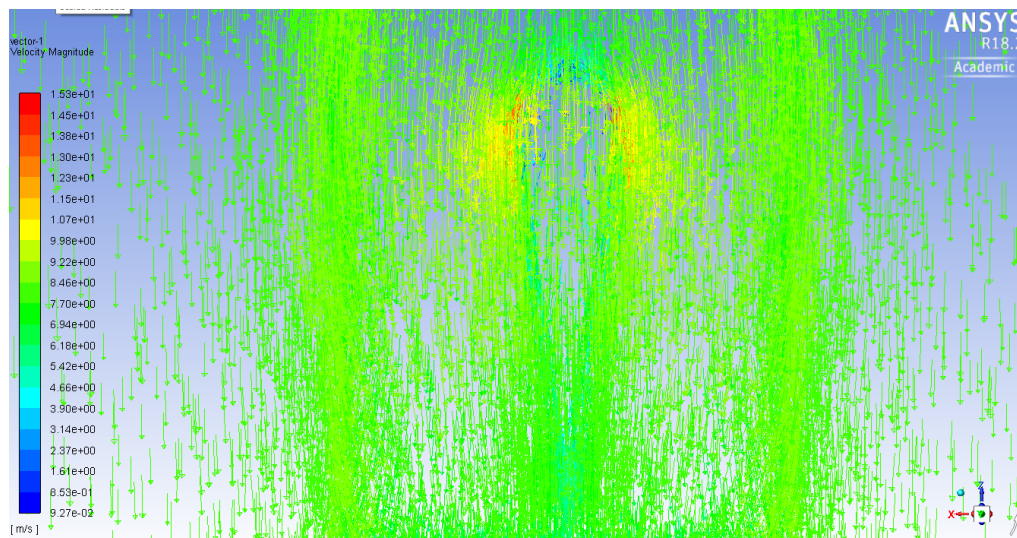


Figura 6.20 Camp de velocitats de la tija

Per últim, a la Figura 6.21 s'observa de forma clara l'estela que apareix en les vores de sortida de l'hydrofoil i de la tija. Augmenta la dimensió d'aquesta en la unió de les dues parts a causa de la singularitat de la geometria.

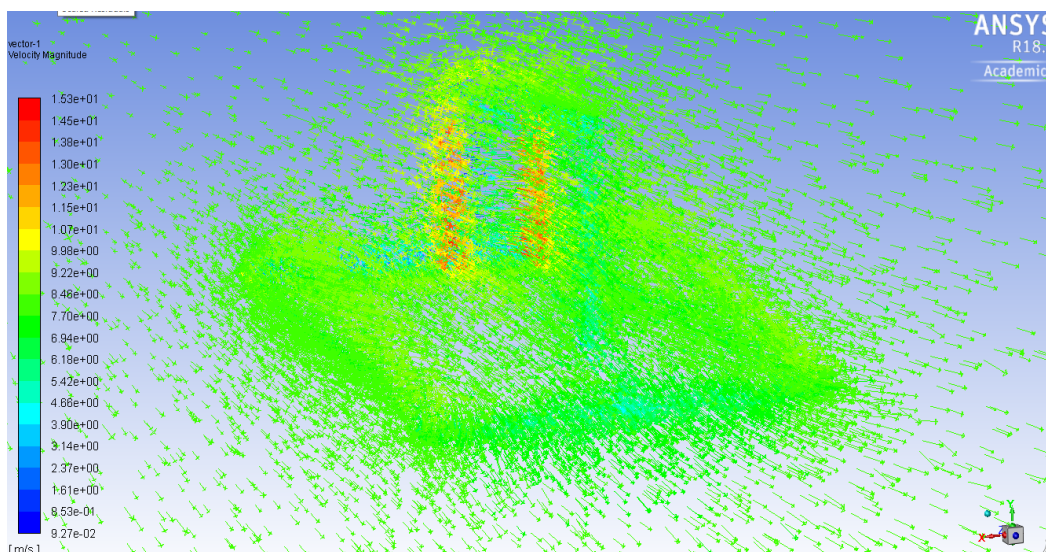


Figura 6.21 Camp de velocitats i visualització de l'estela hydrofoil

## 6.5.2. Línies de corrent

S'utilitzen densitats de línies de corrent molt baixes amb l'objectiu de veure simplement la modificació que pateixen les trajectòries a causa de la geometria. Un augment d'aquesta densitat provocaria la no comprensió del model a causa de la falta de visibilitat en 3D, igual que en el cas del flotador. En la Figura 6.22 i 6.23 s'observen algunes d'aquestes línies, mostrant que aquestes envolten el cos passant per l'extradós i l'intradós i unint-se de nou a la

vora d'atac.

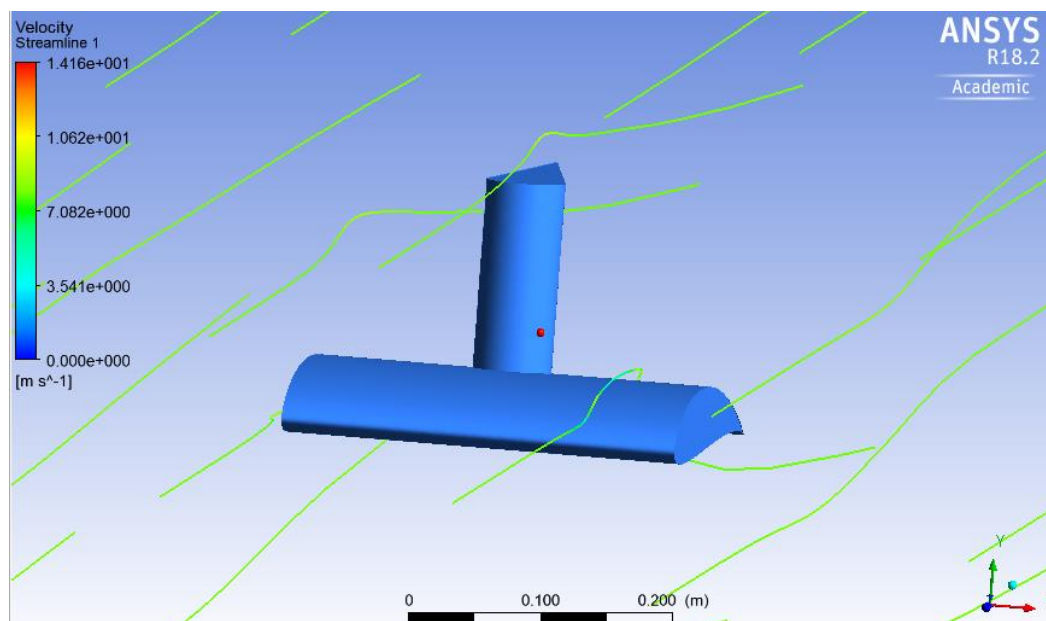


Figura 6.22 Línies de corrent al voltant de l'hydrofoil

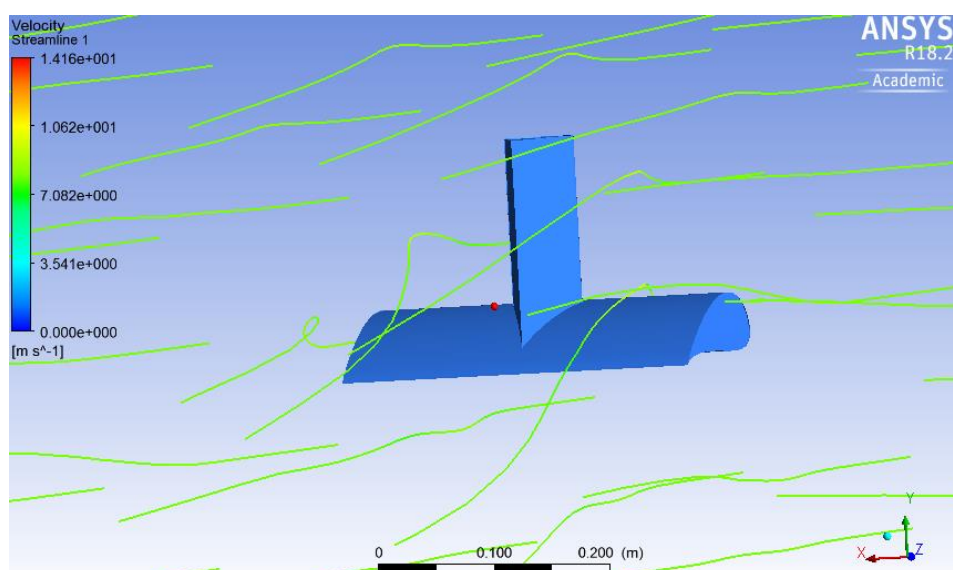


Figura 6.23 Reunió de les línies de corrent en sortir del perfil

En la Figura 6.24 es mostra l'efecte de la resistència a l'avanç induïda en els laterals de l'hydrofoil: la partícula entra per l'intradós i, a causa de la diferència de pressions, puja a l'extradós pel lateral del perfil. Finalment surt creant un vòrtex a l'extrem.

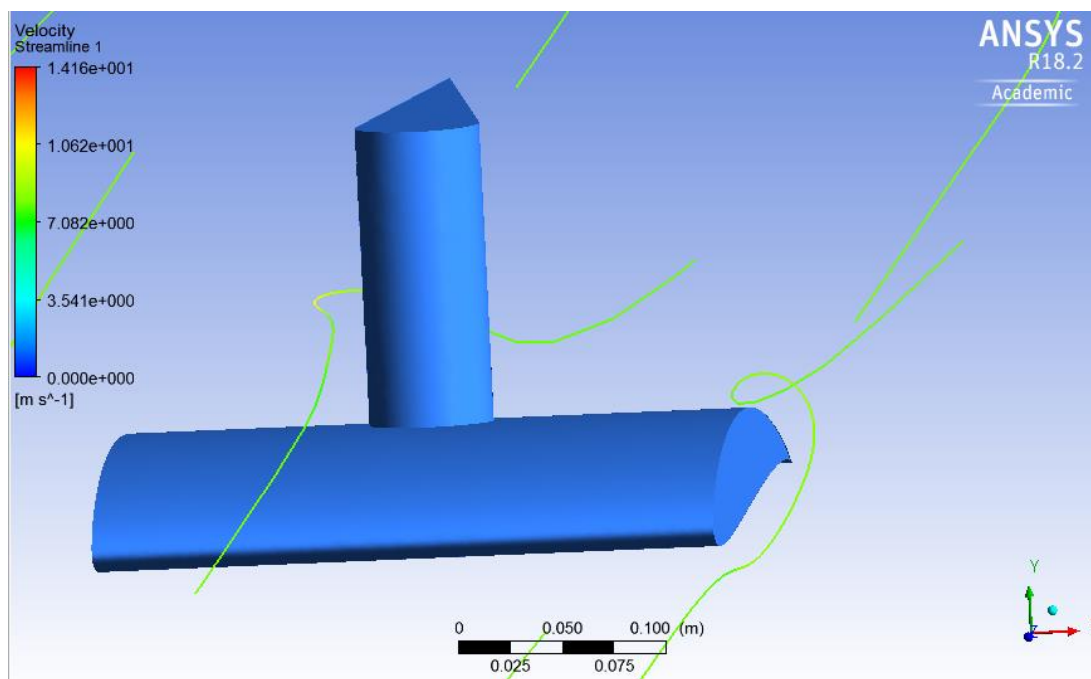


Figura 6.24 Detall de l'efecte de resistència a l'avanç induït

### 6.5.3. Camp de pressions

En la Figura 6.25 i 6.26 es veu l'efecte global de la diferència de pressions entre l'intradós i l'extradós del perfil e66-il. Cal destacar que apareix una depressió a la part inferior just després del caire d'atac, que sorprèn ja que caldria esperar el comportament invers per obtenir sustentació. Malgrat aquest fet, a mesura que el flux s'apropa la vora de sortida augmenta de forma destacable la pressió, donant sentit físic a les forces obtingudes. A la zona de l'extradós apareixen pressions negatives a causa de l'augment de velocitat de les partícules. Per últim es desprèn la capa límit en els laterals de l'hydrofoil, just en el caire d'atac, a causa de l'aresta viva, raó per la qual s'aprecia una disminució de la pressió.

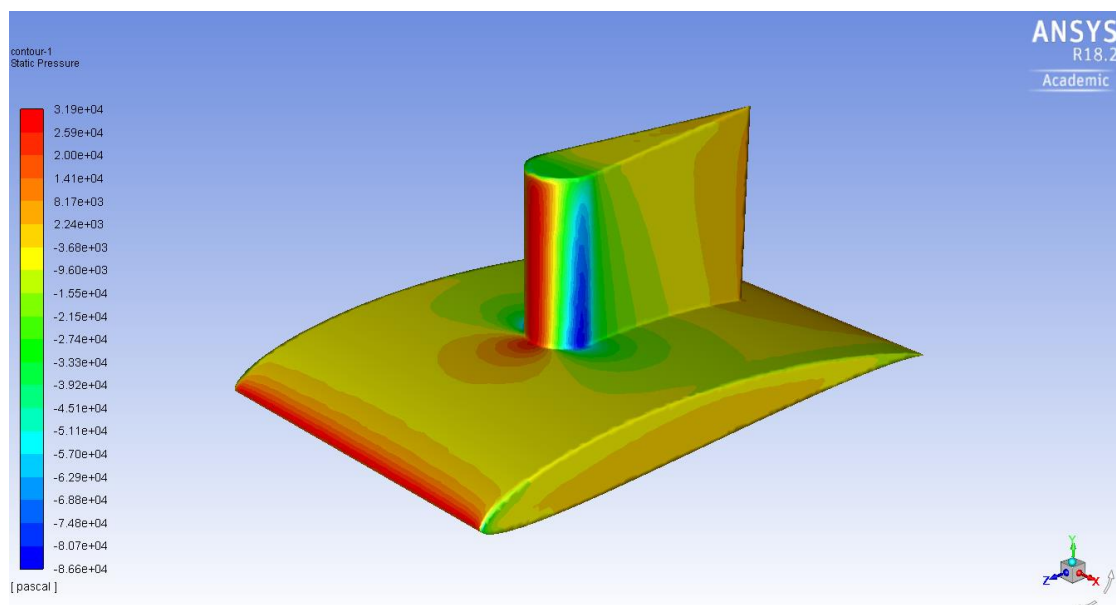


Figura 6.25 Distribució de pressions del dispositiu a l'extradós i tija

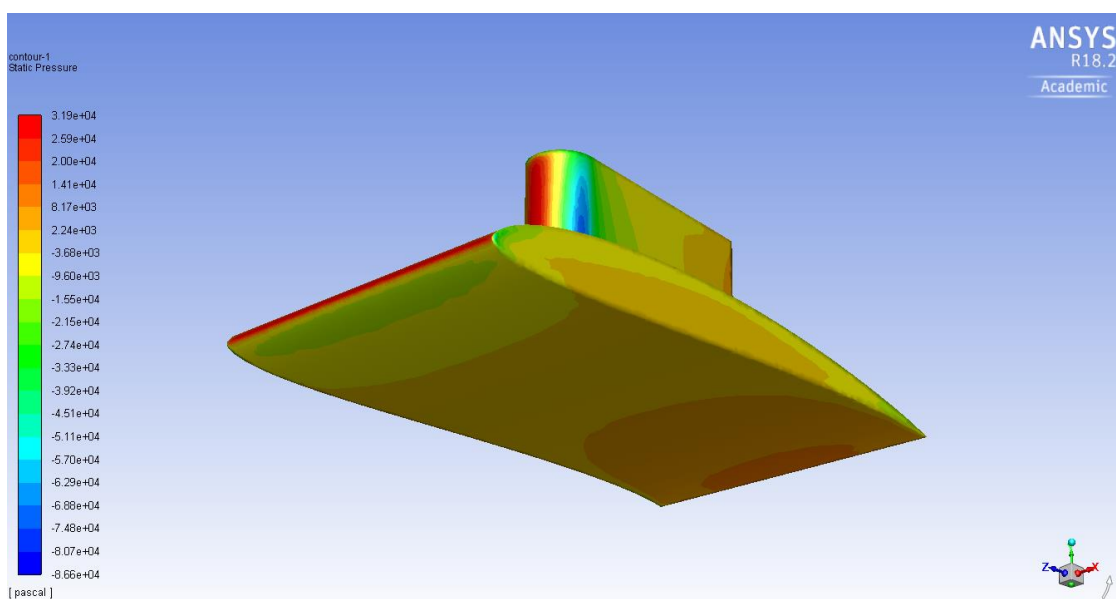
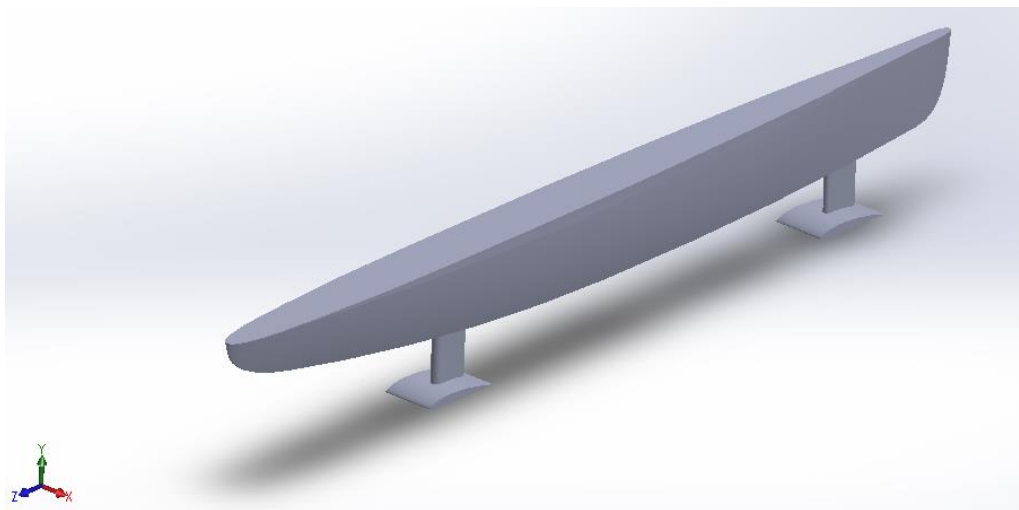


Figura 6.26 Distribució de pressions del dispositiu a l'intradós

## 6.6. Model 3D: exemple de proposta de disseny

Amb una funció purament exemplificativa de com es podria aplicar l'hydrofoil dissenyat, es realitza un model en 3D amb ajuda del SOLIDWORKS. Es pot observar que l'envergadura amb la qual s'ha creat el dispositiu no presenta ningun problema de dimensionament amb el flotador, ja que té una dimensió menor que el valor màxim de la màniga de la coberta. La posició de cadascun dels dispositius és completament arbitrària, però permet observar que la

modificació de l'angle d'atac dels dispositius no resulta un problema degut a la gran dimensió de l'eslora. Cal recordar que el tripulant és l'encarregat de mantenir la distribució de pesos idònia per controlar l'estabilitat dels perfils d'hydrofoil, modificant el centre de gravetat al llarg de la línia de crugia, i la inclinació del patí a l'escorar amb el moment exercit amb el propi pes del seu cos.



*Figura 6.27 Exemple de disseny de flotador amb els dispositius creats*



## 7. Planificació

S'ha realitzat un diagrama de Gantt amb l'objectiu de planificar les diferents fases en les qual s'ha dividit la realització del projecte. La data d'inici s'ha establert el 9 de Febrer de 2018, dia en el qual es va realitzar el registre del TFG. El final s'estipula com l'últim dia del període d'entrega de la memòria escrita. S'ha realitzat el diagrama amb ajuda del programa Gantt Project 2.8.8. En la Taula 7 apareixen totes les activitats dutes a terme juntament amb la seva data d'inici, data de finalització i duració en dies de la tasca.

Nom	Inici	Finalització	Durada
• Recerca bibliogràfica patf	09/02/18	25/02/18	17
• Recerca bibliogràfica dinàmica de fluids	26/02/18	04/03/18	7
• Recerca bibliogràfica hydrofoil	05/03/18	20/03/18	16
• Redacció teoria	19/02/18	20/03/18	30
• Redacció model flotador actual	12/03/18	22/04/18	42
• Redacció model hydrofoil	23/04/18	03/06/18	42
• Redacció altres	24/05/18	13/06/18	21
• Repàs i revisió	14/06/18	17/06/18	4
• SOLIDWORKS flotador	05/03/18	18/03/18	14
• Proves ANSYS flotador	19/03/18	01/04/18	14
• Simulació ANSYS Flotador	02/04/18	03/04/18	2
• Anàlisi resultats flotador	04/04/18	11/04/18	8
• Selecció perfil hydrofoil	12/04/18	17/04/18	6
• Proves ANSYS hydrofoil	18/04/18	04/05/18	17
• Procés iteratiu ANSYS hydrofoil	05/05/18	19/05/18	15
• Simulació ANSYS hydrofoil	20/05/18	21/05/18	2
• Anàlisi resultats hydrofoil	22/05/18	30/05/18	9
• Entrega treball	18/06/18	21/06/18	4

*Taula 7 Inici, final i duració de cada activitat del diagrama de Gantt*

Pel que fa als colors amb els que es representa cada tasca, es mostra en la Taula 8 la llegenda amb els seus significats.

	Recerca Bibliogràfica
	Redacció
	Model i estudi flotador
	Model i estudi hydrofoil
	Entrega treball

*Taula 8 Llegenda de colors*

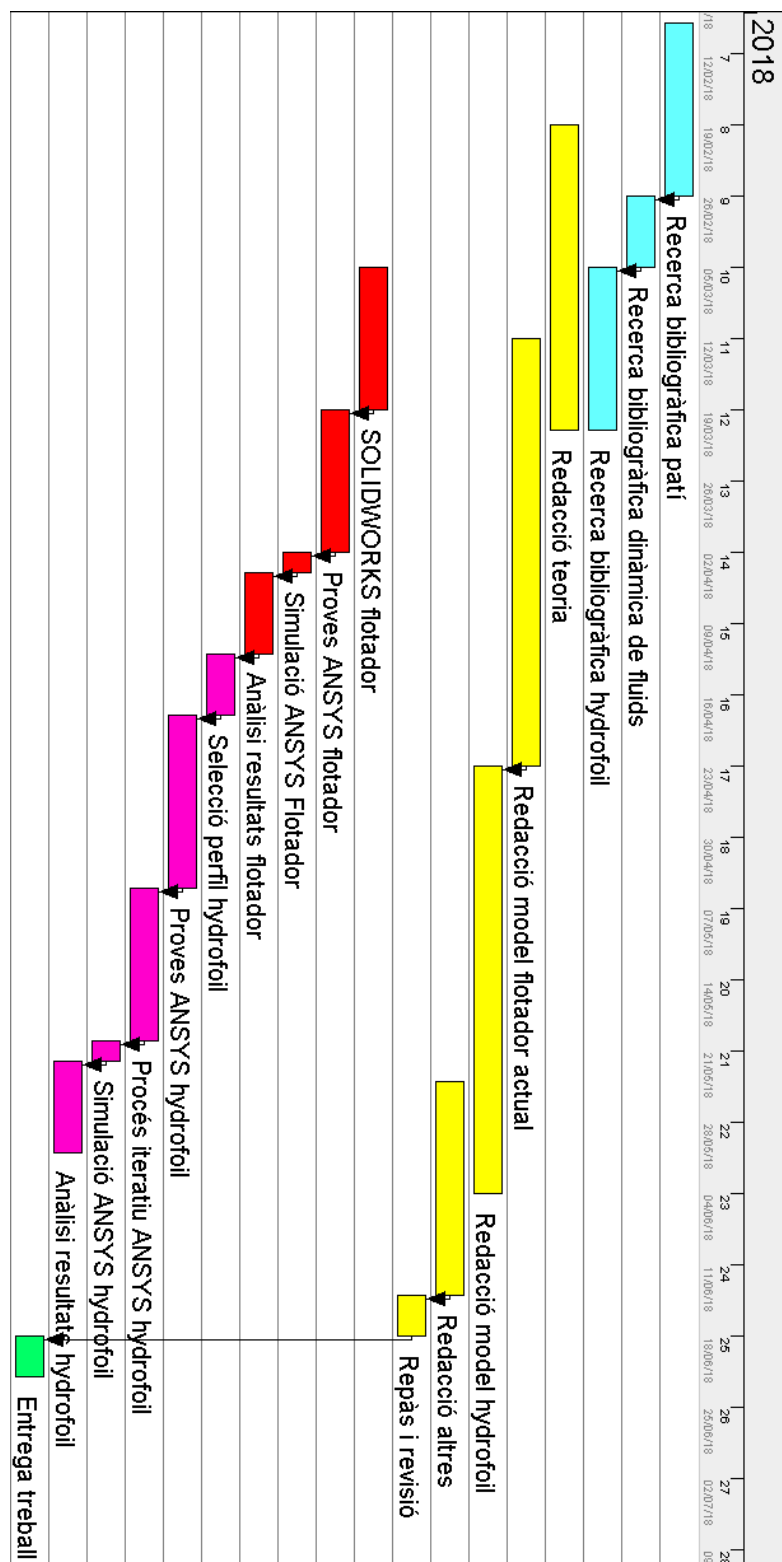


Figura 7.1 Diagrama de Gantt

## 8. Estudi econòmic

S'ha realitzat un estudi econòmic del projecte tenint en compte les diferents despeses que se'n deriven. L'objectiu principal és realitzar una aproximació monetària del cost que podria significar un estudi com aquest. Cal destacar que, al treballar amb simulació per ordinador de problemes CFD, la despesa que suposa és molt menor que si es realitza amb l'ajuda d'un túnel de vent. Aquesta és la principal avantatge que presenta pel que fa a l'estudi experimental d'un model, però en contraposició els resultats obtinguts no són 100% fiables.

Una part vital per a poder fer els càlculs és el programari utilitzat: SOLIDWORKS 2016 i WORKBENCH 18.2. Cal afegir el preu de les llicències d'ús d'ambdós. A més a més, es pot tenir en compte el programari suplementari utilitzat com el paquet OFFICE. Per últim, s'afegeix una aproximació del cost material del projecte: una part proporcional de l'amortització de l'ordinador, material d'oficina i material informàtic suplementari.

En aquest pressupost es té en compte les despeses de personal, corresponents a les hores de feina de l'enginyer que faria el projecte. Basant-se en les hores mínimes necessàries corresponents als 12 crèdits ECTS i observant posteriorment la quantitat de temps destinat en global, es considera un total aproximat de 375 hores per completar l'estudi.

Per últim, es té en compte les despeses d'establiment d'aquest projecte. Es suposa que es realitza en un despatx d'una enginyeria, per exemple. D'aquesta manera es pot considerar el lloguer de l'oficina, estipulat en uns 900 €/mes. Tanmateix, es pot afegir una despesa energètica causada pel consum dels equips emprats: llum, l'ordinador, climatització... A part, cal dir que, durant els períodes de simulació amb ANSYS, l'ordinador ha estat realitzant càlculs durant les nits a causa de l'elevat temps necessari per a convergir, fet que es veurà reflectit en aquesta partida del pressupost. Es considera també la contractació dels serveis d'aigua, internet i telèfon del despatx.

Per obtenir beneficis sobre el cost total, es considera que s'incrementarà un 50% el valor final de l'estudi econòmic. En la Taula 9 es pot observar el pressupost complet i el valor monetari estimat.



<i>Concepte</i>	<i>Quantitat</i>	<i>Preu unitari</i>	<i>Total</i>
<i>Llicència SOLIDWORKS 2016</i>	4 mesos	3.400 €/any	1.133,33 €
<i>Llicència WORKBENCH 18.2</i>	4 mesos	36.390 €/any	12.130 €
<i>Llicència OFFICE</i>	4 mesos	69 €/any	23 €
<i>Material oficina (part proporcional de l'ordinador, paper, impressora, disc dur...)</i>	Partida alçada	650 €	650 €
<i>Enginyer en pràctiques</i>	375 hores	10 €/hores	3.750 €
<i>Lloguer oficina</i>	4 mesos	900 €/mes	3.600 €
<i>Consum energètic</i>	Partida alçada	400 €	400 €
<i>Consum aigua</i>	Partida alçada	200 €	200 €
<i>Internet + telèfon</i>	Partida alçada	50 €	50 €
<b><i>Total pressupost</i></b>			<b>21.936,33 €</b>
<b><i>Total + benefici industrial</i></b>	<b>50% benefici</b>		<b>32.904,50 €</b>
<b><i>Total + benefici industrial + IVA</i></b>	<b>21% IVA</b>		<b>39.814,44 €</b>

*Taula 9 Pressupost del projecte*

## 9. Impacte mediambiental

Cal comentar diversos aspectes sobre l'impacte mediambiental provocat durant la realització d'aquest projecte. Tenen a veure amb diferents àmbits que engloben la totalitat del treball.

La realització de l'estudi s'ha dut a terme de forma teòrica amb ajuda de la modelització i simulació de problemes CFD per ordinador. És per això que la causa principal de la petjada ecològica a tenir en compte és el consum energètic de l'ordinador: S'han necessitat un elevat nombre d'hores per realitzar els càlculs, simulacions, anàlisis de resultats i redacció del propi projecte. Tot i això, no suposa ni un mínim percentatge del consum que hagués estat necessari emprant un túnel de vent per fer l'estudi dels perfils. L'ús d'aquest dispositiu també haguera suposat un desavantatge afegit respecte a la simulació per la necessitat de creació d'un model de cadascuna de les geometries estudiades, però en contraposició els resultats obtinguts haguessin sigut més fiables i exactes. Per mostrar la diferència de la petjada ecològica entre els dos tipus de mètodes, s'adjunta la comparativa aproximada en kg de CO<sub>2</sub> equivalent emesos segons el consum energètic en realitzar un estudi de cada tipus.

<i>Mètode d'estudi</i>	<i>Potència consumida</i>	<i>Hores d'ús</i>	<i>Factor d'emissió</i>	<i>kg CO<sub>2</sub> equivalent</i>
<i>Túnel de vent</i>	18.000 W	15 minuts	0.385 kg de CO <sub>2</sub> /kWh	1,733 kg
<i>Simulació CFD</i>	85 W	1 hora	0.385 kg de CO <sub>2</sub> /kWh	3,273 x 10 <sup>-2</sup> kg

*Tabla 10 Comparativa CO<sub>2</sub> equivalent pel càlcul d'un model*

També es pot dir que, gràcies a l'estudi previ realitzat per la base de dades dels perfils candidats a definir la geometria de l'hydrofoil, es simplifica el consum energètic de simulació dels mateixos en 2D. D'igual forma que en el cas dels flotadors estudiats i dissenyats, si es necessita un túnel de vent encara suposaria una petjada major d'energia i material.

Per últim, es pot observar que caldria tenir en compte la fabricació dels dispositius d'hydrofoil amb fusta i resina epoxy, alumini... (Seria necessari fer un estudi de resistència de tensions per escollir el material emprat) Aquest fet provocaria més ús de matèria per a la construcció de l'embarcació. Tot i això, es podria mirar d'aprofitar al màxim possible els residus generats amb la reutilització, fent mobles de conglomerat o reciclant l'alumini. Al ser un procés artesanal, es pot veure que el consum energètic necessari per crear un patí és relativament baix en comparació a una indústria, ja que es tracta de fabricar quantitats petites.

## Conclusions

Amb aquest projecte s'han pogut extreure un seguit de conclusions que es recullen a continuació.

Per començar, el primer objectiu del treball, referent a realitzar un estudi hidrodinàmic del model actual dels flotadors del patí a vela, s'ha assolit de forma satisfactòria. S'ha pogut concloure que la falta d'estudis i desenvolupament d'aquest disseny, que ha restat gairebé invariant des dels seus inicis, es fan evidents amb els resultats obtinguts. Les forces de resistència a l'avanç del patí són molt elevades i ni tan sols aprofita la força de sustentació per reduir l'àrea de contacte i minimitzar aquest efecte. S'ha pogut veure com interacciona la geometria amb el flux del fluid i el comportament de cada zona del flotador.

Relacionat amb aquesta primera conclusió, s'ha aconseguit assolir el segon objectiu del projecte, pel qual s'ha vist com cal realitzar un estudi de simulació per un model com l'estudiat. Es veu que el comportament del flotador és similar al d'un cilindre carenat, motiu pel qual es necessiten dues referències diferents d'àrea per assolir uns resultats coherents amb CFD dels coeficients de lift i drag: la del cos complet i la projectada de màxima secció respectivament. Tanmateix, s'ha pogut observar la dificultat de generar un mallat d'elevada qualitat en un model 3D degut a la limitació que suposa una llicència de versió estudiant d'ANSYS.

S'ha aconseguit amb èxit crear un nou disseny de flotador per al patí a vela, capaç d'aprofitar la velocitat que adquireix en unes determinades condicions d'ús per elevar l'embarcació de l'aigua amb ajuda de dos hydrofoils. D'aquesta manera, disminueix de forma dràstica la superfície de contacte amb l'aigua, aprofita les forces de sustentació que apareixen en el cos i disminueix molt notòriament les forces de resistència a l'avanç que frenen el cos. Com a resultat s'obté un nou model capaç d'assolir velocitats més elevades, proporcionant una clara millora de les prestacions que inicialment ofereix el patí. De totes maneres, cal destacar que existeix una limitació d'ús a causa de la possible desestabilització que es crearia si els hydrofoils elevessin tant el patí que sobrepassessin totalment o parcialment el nivell del mar, perdent totes les seves propietats.

Pel que fa a l'últim objectiu plantejat en aquest projecte, ha estat possible aprofundir en el coneixement dels hydrofoils i les seves característiques. S'ha realitzat una selecció d'un perfil òptim per a crear el dispositiu i, en realitzar l'estudi de simulació amb CFD, s'observa la base del seu funcionament mitjançant les pressions que apareixen a l'extradós i a l'intradós. També s'ha pogut entendre les modificacions dels valors dels coeficients de drag i lift teòrics esperats, a causa de factors com afegir una tija per unir-ho amb el flotador o l'aparició de l'efecte de resistència a l'avanç induïda.

Caldria en un futur realitzar més estudis amb intenció de determinar la viabilitat d'implantació de l'hydrofoil amb un anàlisi de forces internes i resistència de materials. A més a més, permetria la modificació d'aquest dispositiu amb l'objectiu de perfeccionar el disseny de forma òptima, capacitant-lo per resistir les tensions internes amb la mínima utilització de material per a la seva construcció. Un altre branca on seria interessant indagar en un futur seria un dispositiu que assegurés l'estabilitat del patí en tot moment, modificant les forces de sustentació a mesura que s'augmenta la velocitat del patí per mantenir els hydrofoils en tot moment dins de l'aigua. D'aquesta manera s'eliminarà la màxima limitació i risc del model creat en aquest projecte. Per últim, es podria mirar de modificar els laterals per tal d'eliminar l'efecte de resistència a l'avanç induït.

## Agraïments

En primera instància m'agradaria donar les gràcies al meu tutor del treball de final de grau Enric Trilles per guiar-me i ajudar-me en tot moment. Sense ell aquest treball no hagués estat possible.

També vull agrair l'ajuda proporcionada pels professors Julio García i Agustí Martí, de la facultat de nàutica de la UPC, pel suport proporcionat en els dubtes i problemes que m'han anat sorgint durant els processos de simulació amb CFD. Ha sigut un prestigi poder comptar amb el seu ajut.

Agrair a tots els companys de la universitat que m'han fet un cop de mà durant la realització del projecte.

Per últim agrair a tota la meva família i amics.

# Bibliografia

## Referències bibliogràfiques

- [1] ANTÓN J. *El hombre del verano en Formentera*. El país. 1 de Setembre de 2012 , recuperat de [https://elpais.com/ccaa/2012/08/31/catalunya/1346444432\\_677337.html](https://elpais.com/ccaa/2012/08/31/catalunya/1346444432_677337.html)
- [2] YATCH CLUB PAYSANDÚ ( Març de 2016) , Instrucciones de regata, yce, Recuperat de <http://www.yce.org.ar/wp-content/uploads/2016/03/Instrucciones-de-regata-2%C2%BA-F-GPRU-2016.pdf> , consultat el 15 de Febrer de 2018.
- [3] CLUB PATÍ VELA BARCELONA, (2016), Escola de vela, *Club Patí Vela Barcelona*, Recuperat de <http://www.pativelabarcelona.com/aula/> , Consultat el 16 de Febrer de 2018.
- [4] WIKIPEDIA, (7 de Juny de 2018), Principi de Bernoulli, *Wikipedia*, Recuperat de [https://es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli) , consultat el 27 de Febrer de 2018.
- [4] WIKIPEDIA (17 de setembre de 2017), Capa límit, *Wikipedia*, Recuperat de [https://es.wikipedia.org/wiki/Capa\\_l%C3%ADmite](https://es.wikipedia.org/wiki/Capa_l%C3%ADmite) , consultat el 28 de Febrer de 2018.
- [5] PALLICER, M. (22 de setembre de 2016), El efecto Magnus, *Fisicadebar*, Recuperat de <http://fisicadebar.com/2016/09/22/el-efecto-magnus/> , consultat el 2 de Març de 2018.
- [6] NAVE, R. (2017), Bernoulli or Newton's law for lift? , *Hyperphysics*, Recuperat de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Fluids/airfoil.html> , consultat el 5 de Març de 2018.
- [7] ANIMAL DE RUTA ,(28 de novembre de 2011), ¿Por qué vuela un avión? , *Animal de ruta*, Recuperat de <https://animalderuta.com/2011/11/28/por-que-vuela-una-avion-dummies-guide/> , consultat el 7 de Març de 2018.
- [8] MUÑOZ, M. A. (sense data) , Principios básicos, *Manualvuelo*, Recuperat de <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html> , consultat el 10 de Març de 2018.
- [9] WIKIPEDIA, (2 de Març de 2009), Archivo: Perfil alar, *Wikipedia*, recuperat de [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Perfil\\_alar\\_1.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Perfil_alar_1.svg) , consultat el 11 de Març de 2018.
- [10] SIMLEM (sense data), Profil de l'aile, *Simlemasson*, Recuperat de [http://simlemasson.free.fr/tpeaerodynamisme\\_finesse\\_profilde\\_l\\_aile.htm](http://simlemasson.free.fr/tpeaerodynamisme_finesse_profilde_l_aile.htm) , consultat el 12 de Març de 2018.
- [11] PATINERO, (2017), *Patinero*, Recuperat de <http://www.patinero.com/> , consultat el 22

de Febrer de 2018.

[12] ADIPAV (2018) Reglamento de la disciplina Patín a vela, classe patín a vela, entrada en vigor 2018, *ADIPAV*, recuperat de [http://www.adipav.org/sites/default/files/20180203\\_2018Reglamento%20de%20la%20Disciplina%20Pat%C3%ADn%20a%20Vela%20negre%20%281%29.pdf](http://www.adipav.org/sites/default/files/20180203_2018Reglamento%20de%20la%20Disciplina%20Pat%C3%ADn%20a%20Vela%20negre%20%281%29.pdf) , consultat el 12 de Febrer de 2018

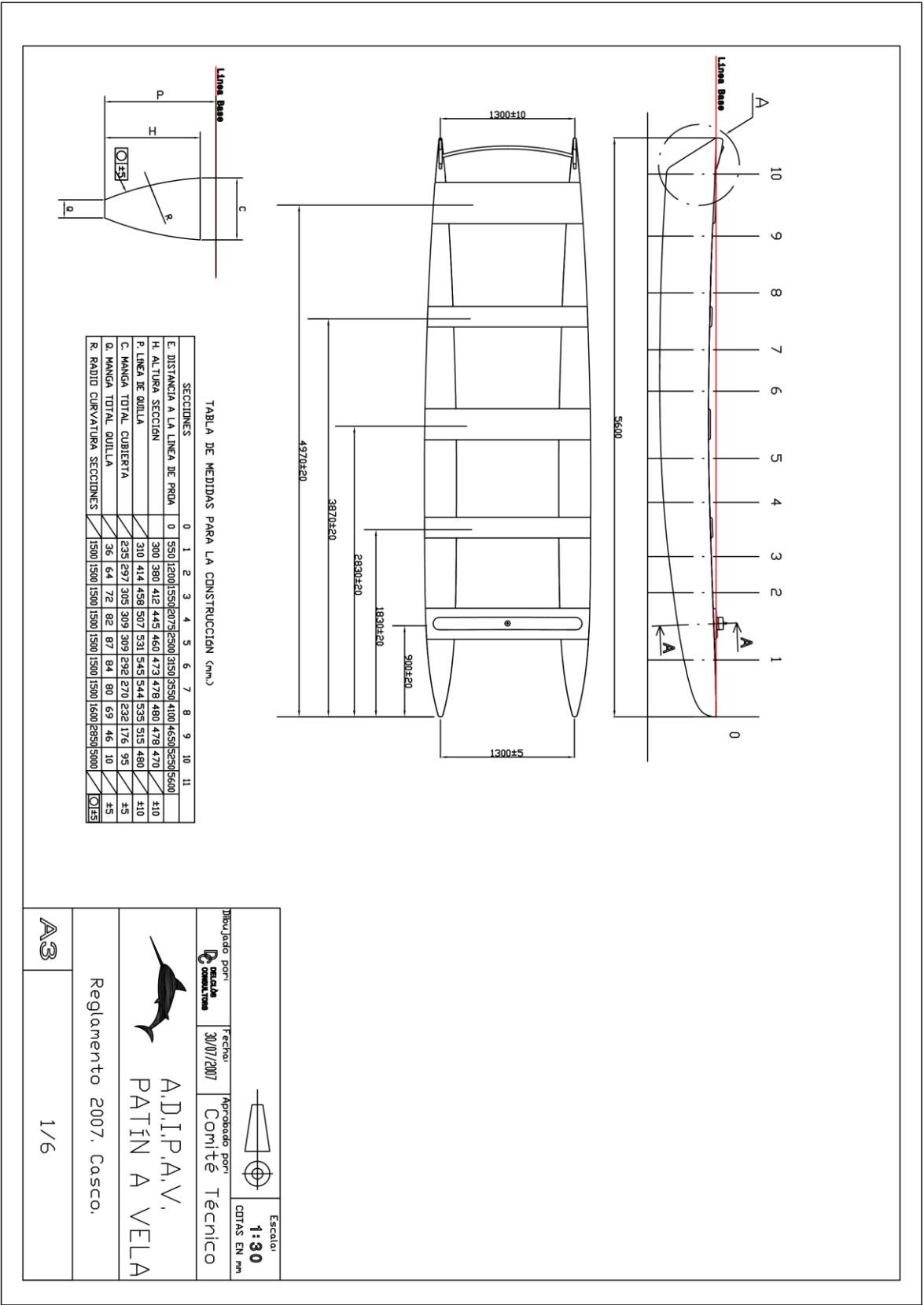
## **Bibliografia complementària**

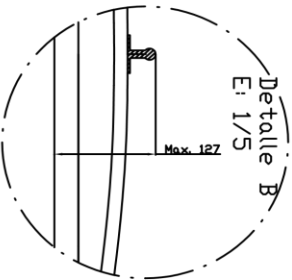
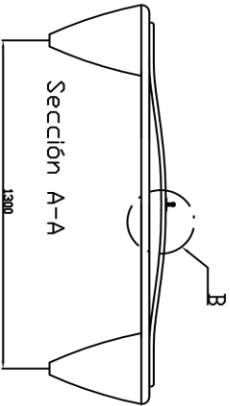
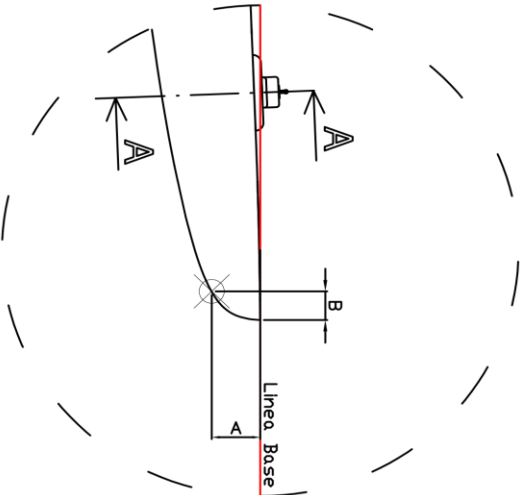
“ PEDREIRA, R. ESTEVA, G. PUJOL, A. HUERTAS, R. DEPOORTER, J. COMAJUNCOSA, J. LLOBET, J. PEDREIRA, M., (2007), *Navegando en Patín a Vela*, Badalona, Espanya, Editorial Paidotribo. “.

## **Annexos**


### **Annex 1: Plànols de construcció del patí a vela [12]**

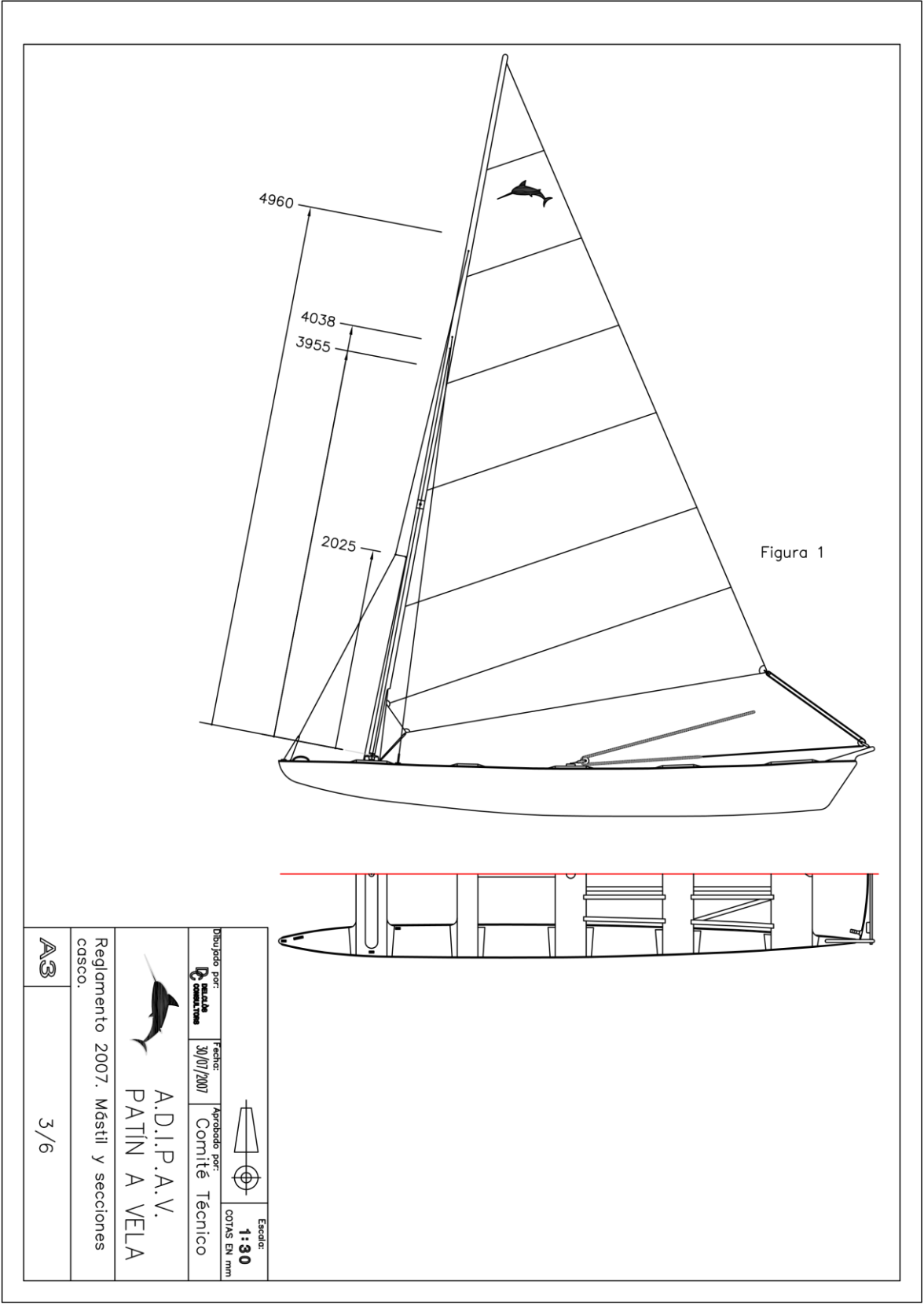


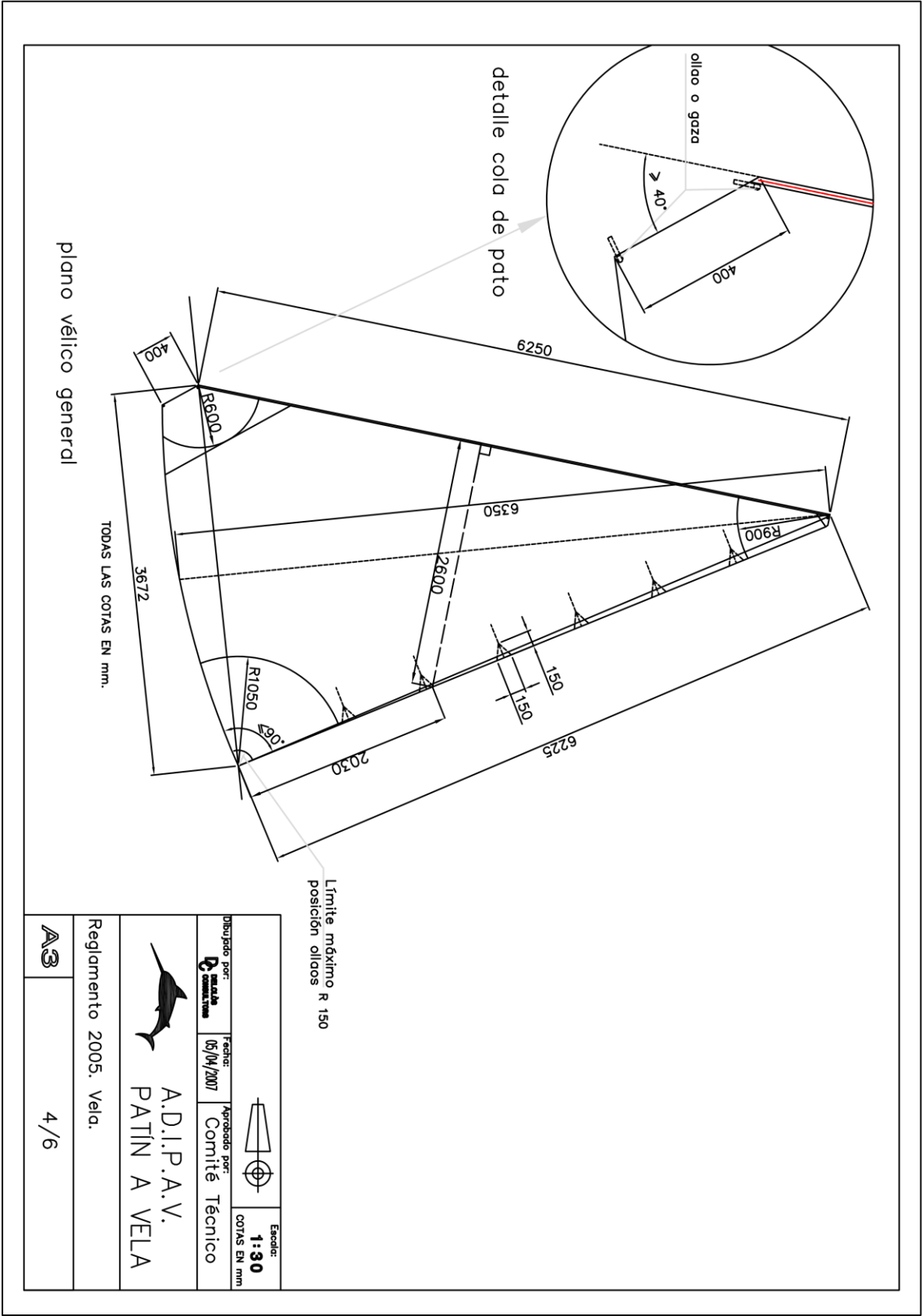


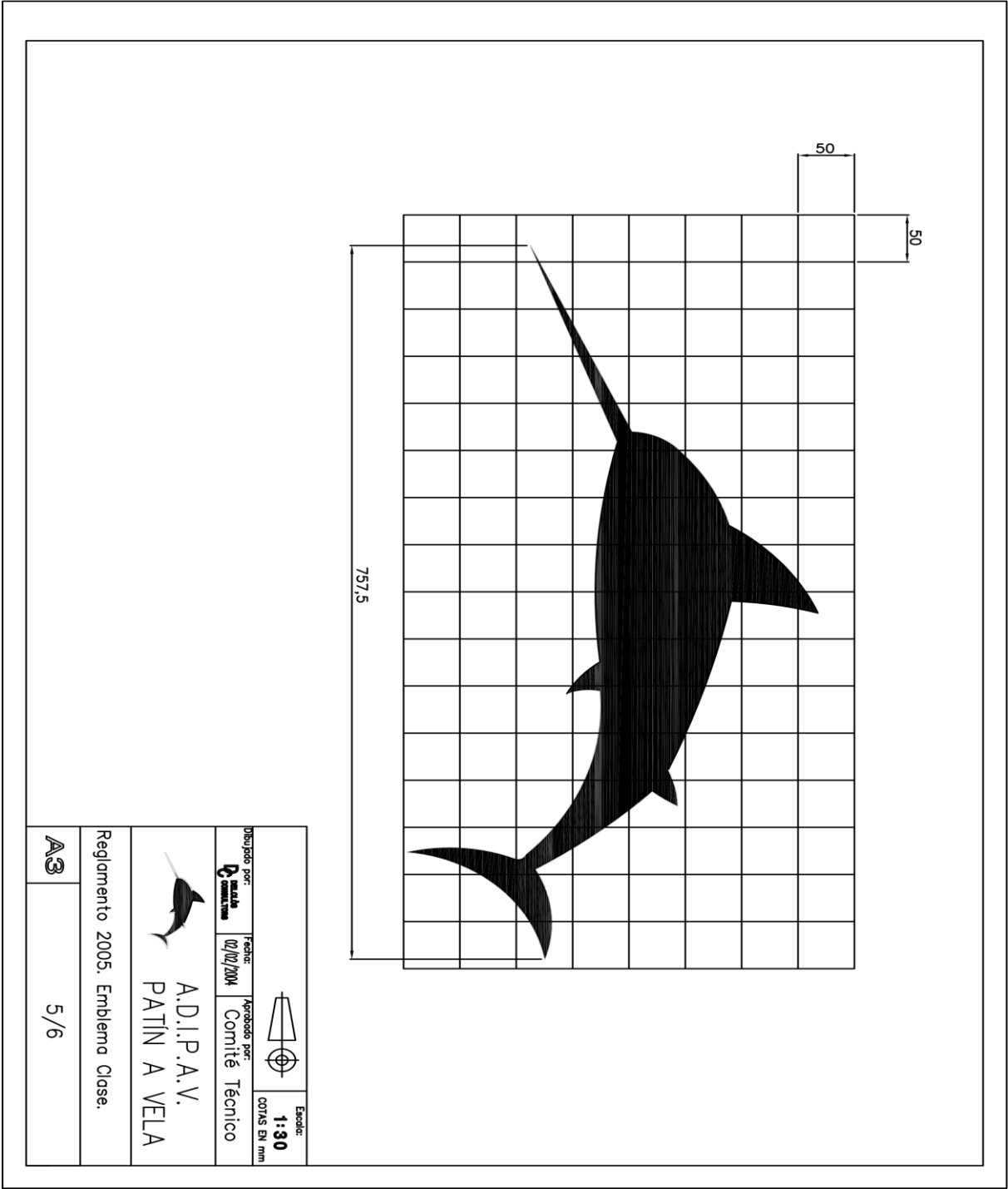


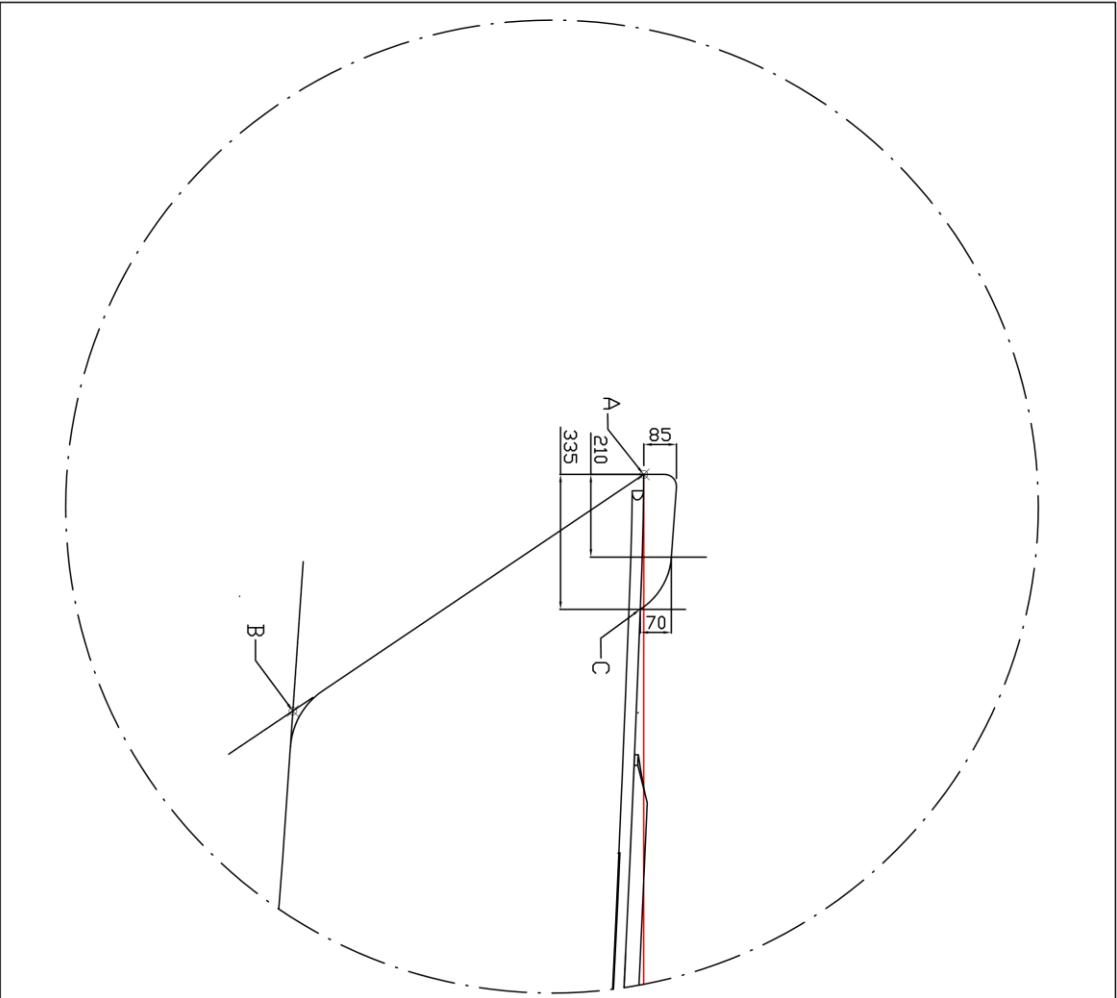
PUNTOS	A (mm)	B (mm)
1	50	6
2	100	23
3	150	63,5
4	175,5	100
5	201	150
6	221	200
7	252	300
8	277	400
9	310	550



Dibujado por: 		Fecha: 20/6/2014		Aprobado por: Comité Técnico		Escala: 1/15	
A.D.I.P.A.V.,		PATÍN A VELA		Reglamento 2005. Detalle Proa.		A3	
2/6							









Dibujado por: <b>Desa de Consultores</b>		Fecha: 30/07/2007	Aprobado por: Comité Técnico		Escala: 1:5 CITAS EN mm
		A.D.I.P.A.V., PATÍN A VELA			
Reglamento 2007. Soporte barra de escota.					
A3		6/6			